



**João Daniel Resende
Lopes**

**Estudo de métodos de calibração de sensores
capacitivos**



**João Daniel Resende
Lopes**

**Estudo de métodos de calibração de sensores
capacitivos**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Dr. Pedro Nicolau Faria da Fonseca, Professor Auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro, coorientação do Dr. José Luís Costa Pinto de Azevedo, Professor Auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro, e coorientação do Eng. Manuel Loureiro da Empresa Exatronic.

Dedico este trabalho à minha família e amigos pela amizade, carinho e o apoio que me deram ao longo de todos estes anos.

O júri

Presidente

Prof. Dr. Manuel Bernardo Salvador Cunha
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogais

Prof. Dr. Urbano José Carreira Nunes
Professor Associado da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Prof. Dr. Pedro Nicolau Faria da Fonseca
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (orientador)

Prof. Dr. José Luís Costa Pinto de Azevedo
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (coorientador)

Agradecimentos

Gostaria de começar por agradecer ao meu orientador, Prof. Pedro Fonseca, e ao meu coorientador, Prof. José Luís Azevedo, da Universidade de Aveiro por me terem proporcionado esta experiência, pela sua disponibilidade e pelo seu apoio. De igual modo, quero agradecer a todos os funcionários pertencentes aos quadros da Exatronic pelo acolhimento na empresa. Um agradecimento em especial ao Eng. Manuel Loureiro e ao Eng. André Santos que sempre me acompanharam e apoiaram no necessário durante todo o período de desenvolvimento de trabalho para esta Dissertação.

Um agradecimento muito forte ao meu grande e eterno amigo Bruno Pinheiro pela paciência e amizade partilhada nos momentos bons e nos momentos menos bons da minha vida.

Quero agradecer aos meus colegas e amigos, em especial ao Filipe Barradas, Tiago Cantão, Ricardo Ribeiro, Rui Fiel e César Gomes pelos 5 anos fantásticos que passamos juntos. Um forte abraço para o Ricardo Morais, Fabio Costantino, Cristóvão Leal e Jorge Miguel Pereira pelos momentos únicos partilhados. Um abraço ao Márcio Silva e um beijo à Catarina Marques pela amizade.

Por último, agradeço a toda a minha família, em especial aos meus pais, João Lopes e Maria Emília Lopes, que sempre me acompanharam, apoiaram incondicionalmente e acarinharam ao longo de toda a minha vida. Também agradeço aos meus avós que sempre estiveram presentes nos momentos importantes.

...

Palavras-chave

Sensores capacitivos, toque, métodos de calibração

Resumo

Os sensores são dispositivos que respondem com um sinal elétrico a um estímulo ou sinal do “mundo exterior”, permitindo a um qualquer equipamento eletrónico obter informação desse mundo para que possa atuar em conformidade.

Os sensores podem ser encontrados num vasto domínio de aplicações. Existem sensores de luz, temperatura, som, radiação, magnéticos, pressão, movimento, velocidade, aceleração, orientação, mecânicos, entre outros, cujas suas utilizações vão desde uma vasta gama de aplicações industriais até ao mais simples equipamento eletrónico doméstico.

Nesta dissertação serão alvo de estudo sensores capacitivos, mais concretamente a sua aplicação na deteção do toque humano. Os sensores capacitivos são utilizados numa ampla gama de dispositivos, desde telemóveis, leitores de mp3, controlos remotos, fogões, entre outros.

O objetivo deste projeto consiste em identificar condições de utilização dos sensores capacitivos, desde materiais, algoritmos de validação da deteção do toque, geometria do sensor e deteção de movimento, dando relevância ao conhecimento sobre o comportamento esperado em função do material, da espessura e de outros parâmetros que possam influenciar, positiva ou negativamente, a sensibilidade dos sensores capacitivos ao toque humano.

Keywords

Capacitive sensing, touch, calibration methods

Abstract

Sensors are devices that respond with an electrical signal to a stimulus or signal from the "outside world", allowing an electronic device to get any information from that world so they can act accordingly.

The sensors can be found in a great range of applications. There are light sensors, temperature, sound, radiation, magnetic, pressure, motion, velocity, acceleration, orientation, mechanical, among others, which are applied from a wide range of industrial applications until the simplest household electronic equipment.

Capacitive sensors are the subject of study of this dissertation, specifically its application in human touch detection. Capacitive sensors are used in a wide range of devices, from mobile phones, MP3 players, remote controls, stoves, among others.

The objective of this project is to identify conditions of use for capacitive sensors, provided materials, validation of touch detection algorithms, sensor's geometry and motion detection, giving relevance to the knowledge about the expected behaviour according to material, thickness and others parameters that may influence, positively or negatively, the sensitivity of the capacitive sensors to the human touch.

Conteúdo

| | |
|---|------|
| Conteúdo | viii |
| Lista de Figuras | x |
| Lista de Tabelas..... | xiii |
| Lista de Equações..... | xiv |
| Lista de Acrónimos | xv |
| 1. Introdução | 1 |
| 1.1. Âmbito e Motivação..... | 1 |
| 1.2. Enquadramento Tecnológico..... | 1 |
| 1.3. Objetivos | 2 |
| 1.4. Estrutura da Dissertação..... | 3 |
| 2. Estado da Arte: Sensores Capacitivos na Detecção do Toque Humano | 5 |
| 2.1. Princípio de Funcionamento..... | 5 |
| 2.2. Construção de um Transdutor Capacitivo | 9 |
| 2.3. Técnicas de Medida da Capacidade | 12 |
| 2.4. Problemas e Limitações Associados a Sensores Capacitivos..... | 19 |
| 2.5. Robustez no Processo de Leitura: Soluções de <i>Software</i> | 33 |
| 2.6. Uso de 3 Placas Metálicas na Construção de Transdutores Capacitivos..... | 35 |
| 2.7. Régua Capacitiva..... | 36 |
| 2.8. Conclusão | 39 |
| 3. Conjuntos de Desenvolvimento | 41 |
| 3.1. PICDEM TOUCH SENSE 1 Development Kit | 41 |
| 3.2. Atmel XPLAIN Kit | 49 |
| 3.3. Conclusão | 57 |
| 4. Trabalho Experimental e Análise de Resultados: <i>Microchip</i> | 59 |
| 4.1. Geometria do Transdutor | 59 |
| 4.2. Tensão de Referência dos Comparadores | 62 |
| 4.3. Superfícies de Toque..... | 65 |
| 4.4. Resposta a Ambiente Hostis..... | 69 |
| 4.5. Conclusão | 72 |
| 5. Trabalho Experimental e Análise de Resultados: <i>Atmel</i> | 75 |
| 5.1. QTOUCH Xplained..... | 75 |
| 5.2. Outro Teclados Capacitivos | 79 |
| 6. Calibração Final de Sensores Capacitivos..... | 95 |
| 6.1. Filtros Digitais..... | 95 |
| 6.2. <i>Firmware</i> Demonstrador de Tecnologia | 96 |
| 6.3. Régua Capacitiva Analógica | 98 |
| 6.4. Régua Capacitiva Digital | 106 |
| 6.5. Conclusão | 108 |
| 7. Conclusões e Trabalho Futuro..... | 111 |
| Bibliografia | 115 |

| | |
|-------------|-----|
| Anexos..... | 117 |
|-------------|-----|

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 Capacidade formada por 2 placas condutoras em paralelo | 1 |
| Figura 2 Transdutor Capacitivo com uma Capacidade Base C_p | 5 |
| Figura 3 Toque Humano no Transdutor | 6 |
| Figura 4 Capacidade Mútua | 7 |
| Figura 5 Variação da Capacidade devido ao Toque | 7 |
| Figura 6 Posição do dedo baseado na alteração da capacidade mútua de sensores | 8 |
| Figura 7 Superfície Capacitiva [6] | 8 |
| Figura 8 Distribuição dos planos de <i>terra</i> nas camadas do PCB | 10 |
| Figura 9 Conversão $C_S - R_{eq}$ | 14 |
| Figura 10 Circuito de leitura do transdutor capacitivo | 14 |
| Figura 11 Diagrama do circuito de leitura | 15 |
| Figura 12 Exemplo da <i>Texas Instruments</i> para o Oscilador RC | 16 |
| Figura 13 Princípio para determinação da frequência de oscilação | 17 |
| Figura 14 Diagrama de Blocos do Circuito de Leitura | 17 |
| Figura 15 Diagrama temporal da determinação de toque | 18 |
| Figura 16 Desmodulador Síncrono | 18 |
| Figura 17 Circuito de Leitura sem toque | 20 |
| Figura 18 Efeito de um dedo no Transdutor Capacitivo | 20 |
| Figura 19 Representação do Circuito do eletrodo de blindagem | 21 |
| Figura 20 Variação da Impedância de um Condensador com a Frequência | 23 |
| Figura 21 Resposta em Frequência de um filtro passa-baixo | 24 |
| Figura 22 Componente não usado numa aplicação com sensores capacitivos | 24 |
| Figura 23 Uso de Resistências de 0Ω para prevenir a criação de antenas RF | 24 |
| Figura 24 Demonstração da importância da indutância nas malhas de desacoplamento | 25 |
| Figura 25 Influência do Campo Magnético em enrolamentos de correntes | 26 |
| Figura 26 Necessidade do caminho de retorno para a <i>terra</i> através do corpo humano | 27 |
| Figura 27 Bloqueio de ruído RF conduzido por aumento da impedância das linhas de alimentação | 28 |
| Figura 28 Variação da Impedância de uma Indutância Real com a Frequência | 29 |
| Figura 29 Uso de um transistor BJT para proteção contra descargas eletroestáticas | 30 |
| Figura 30 Corrente Média Consumida versus Número de Ativações do Microcontrolador por mS | 32 |
| Figura 31 Exemplo de um Filtro IIR | 34 |
| Figura 32 Sensor Capacitivo baseado em 3 placas condutoras | 35 |
| Figura 33 Régua Capacitiva Analógica | 37 |
| Figura 34 Detecção de um dedo numa Régua Capacitiva | 38 |
| Figura 35 Resposta da Régua Capacitiva ao Toque | 38 |
| Figura 36 Vista Superior do PICDEM Kit | 41 |
| Figura 37 Vista Inferior do PICDEM Kit | 42 |
| Figura 38 Oscilador RC | 42 |
| Figura 39 Ciclos de carga e descarga do Condensador | 43 |
| Figura 40 Diagrama do Algoritmo Software do Fabricante | 45 |
| Figura 41 Atualização da variável <i>average</i> | 46 |
| Figura 42 Atualização da variável <i>average</i> | 46 |
| Figura 43 Diagrama do Algoritmo Software | 48 |
| Figura 44 Placa AVR Xplain | 49 |
| Figura 45 <i>Qtouch Xplained</i> | 49 |
| Figura 46 Método de aquisição <i>QTouch</i> da <i>Atmel</i> | 50 |
| Figura 47 Influência do toque no método <i>QTouch</i> da <i>Atmel</i> | 51 |
| Figura 48 Régua Capacitiva Constituída por 3 Transdutores | 51 |
| Figura 49 Variação ideal do sinal dos sensores com a passagem do dedo | 52 |

| | |
|---|----|
| Figura 50 Régua Capacitiva Interpolada com resistências..... | 52 |
| Figura 51 Circuito de Ampère..... | 53 |
| Figura 52 Princípio de Funcionamento do <i>QMatrix</i> | 54 |
| Figura 53 Influência do dedo no campo elétrico entre os transdutores | 55 |
| Figura 54 Diagrama do Algoritmo de Software | 55 |
| Figura 55 Conjunto Desenvolvimento da <i>Microchip</i> | 60 |
| Figura 56 Variação do Sinal do Sensor devido a um Toque Direto (Transdutor a descoberto)..... | 61 |
| Figura 57 Variação do Sinal do Sensor devido a um Toque com uma Superfície em Acrílico (3mm de espessura) | 61 |
| Figura 58 Diferença entre Tensões de Referência versus Sensibilidade ao Toque com Superfície de Toque em Acrílico (1.5mm de espessura)..... | 63 |
| Figura 59 Diferença entre Tensões de Referência versus Sensibilidade ao Toque com Superfície de Toque em Acrílico (3mm de espessura)..... | 64 |
| Figura 60 Influência da espessura da superfície de toque na sensibilidade ao toque | 65 |
| Figura 61 Influência da espessura da superfície de toque na sensibilidade ao toque | 66 |
| Figura 62 Previsão teórica da influência do toque no sensor em função da permissividade do material dielétrico e da sua espessura..... | 66 |
| Figura 63 Influência do tipo de material na sensibilidade ao toque | 67 |
| Figura 64 Experiência com Superfície de Toque de Material Misto..... | 68 |
| Figura 65 Sensibilidade ao Toque com uma Superfície de 7mm | 69 |
| Figura 66 Teclado Capacitivo Humedecido | 70 |
| Figura 67 Toque num Teclado Capacitivo Humedecido..... | 70 |
| Figura 68 Teclado Capacitivo com grande Quantidade de Água sobre ele..... | 71 |
| Figura 69 Toque num Teclado Capacitivo com Água | 71 |
| Figura 70 Detecção do Toque na Presença de Ruído de Radiofrequência..... | 72 |
| Figura 71 AVR <i>Xplain</i> ligado ao <i>QTouch Xplained</i> | 75 |
| Figura 72 Influência na Sensibilidade ao Toque de uma Camada de PCB (1.4mm de espessura) .. | 76 |
| Figura 73 Previsão Teórica da Relação entre a Sensibilidade do Sensor e a Espessura da Superfície de Toque..... | 77 |
| Figura 74 Sensibilidade ao Toque do teclado <i>QTouch Xplained</i> para várias Espessuras de Superfícies de Toque..... | 78 |
| Figura 75 Sensibilidade ao Toque do <i>QTouch Xplained</i> com uma Superfície de Toque de Vidro (4mm de espessura)..... | 79 |
| Figura 76 Teclado composto por oito transdutores capacitivos | 80 |
| Figura 77 Sensibilidade ao toque em função da área do transdutor | 81 |
| Figura 78 Ligação do Teclado Capacitivo ao Microcontrolador..... | 82 |
| Figura 79 Influência do Comprimento de uma Ligação na Sensibilidade ao Toque | 82 |
| Figura 80 Régua Capacitiva Espacialmente Interpolado | 83 |
| Figura 81 Sinal de uma Régua Capacitiva com uma Ligação Microcontrolador-Transdutor Longa | 83 |
| Figura 82 Sinal de uma Régua Capacitiva com uma Ligação Microcontrolador-Transdutor Curta | 84 |
| Figura 83 Teclado composto por 8 Transdutores Capacitivos e Plano de Massa | 85 |
| Figura 84 Influência do plano de "terra" na sensibilidade de um sensor (transdutor: 16*16mm) ... | 85 |
| Figura 85 Influência do plano de "terra" na sensibilidade de um sensor (transdutor: 14*14mm) ... | 86 |
| Figura 86 Planos..... | 86 |
| Figura 87 Espessura da Superfície de Toque versus Sensibilidade ao Toque..... | 87 |
| Figura 88 Superfícies de Toque com Planos Condutores Flutuantes | 88 |
| Figura 89 Influência de Planos Condutores Flutuantes versus Sensibilidade ao Toque | 89 |
| Figura 90 Influência do Condensador de Amostragem na Sensibilidade ao Toque..... | 90 |
| Figura 91 Sensibilidade ao Toque versus Capacidade do Condensador de Amostragem..... | 90 |
| Figura 92 Régua Capacitiva..... | 91 |
| Figura 93 Sinal de uma Régua Capacitiva Espacialmente Interpolado..... | 92 |
| Figura 94 Posição atribuída ao Dedo numa Régua Capacitiva Espacialmente Interpolado..... | 92 |
| Figura 95 Sinal de uma Régua Capacitiva Interpolada com Resistências..... | 93 |

| | |
|---|-----|
| Figura 96 Posição atribuída ao Dedo na Régua Capacitiva Interpolada com Resistências..... | 93 |
| Figura 97 Diagrama do Algoritmo de <i>Firmware</i> Demonstrador da Tecnologia..... | 97 |
| Figura 98 Régua Capacitiva com Geometria Retangular..... | 99 |
| Figura 99 Resposta de uma Régua Capacitiva (Superfície Toque com Acrílico:4.5mm e Vidro:4mm)..... | 100 |
| Figura 100 Resposta de uma Régua Capacitiva (Superfície Toque com Acrílico:3mm e Vidro:4mm)..... | 101 |
| Figura 101 Resposta da Régua Capacitiva com o Vidro Humedecido | 101 |
| Figura 102 Resposta da Régua Capacitiva existindo uma Poça de Água sobre o Vidro | 102 |
| Figura 103 Resposta da Régua de Capacitiva na proximidade de um Emissor de Radiofrequência | 103 |
| Figura 104 Régua Capacitiva com Geometria Triangular..... | 103 |
| Figura 105 Resposta de uma Régua Capacitiva (Superfície Toque com Acrílico:4.5mm e Vidro:4mm)..... | 104 |
| Figura 106 Resposta de uma Régua Capacitiva (Superfície Toque com Acrílico:3mm e Vidro:4mm)..... | 105 |
| Figura 107 Resposta de uma Régua Capacitiva (Superfície Toque com Acrílico:4.5mm e Vidro:4mm) num Vidro de Geometria Retangular | 106 |
| Figura 108 Régua Capacitiva Digital..... | 106 |
| Figura 109 Resposta de uma Régua Capacitiva (Superfície Toque com Acrílico:4.5mm e Vidro:4mm)..... | 107 |
| Figura 110 Resposta de uma Régua Capacitiva (Superfície Toque com Acrílico:4.5mm e Vidro:4mm) num Vidro de Geometria Retangular | 108 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 Propriedades Dielétricas [8] | 11 |
| Tabela 2 Técnicas de Medida da Capacidade usadas pelos Fabricantes | 12 |
| Tabela 3 Sequência de Transferência de Carga..... | 15 |
| Tabela 4 Tabela de Verdade Latch SR..... | 43 |
| Tabela 5 Ausência de Toque | 95 |
| Tabela 6 Presença de Toque..... | 96 |
| Tabela 7 Ruído no Sistema..... | 99 |
| Tabela 8 Ruído no Sistema..... | 104 |
| Tabela 9 Ruído no Sistema..... | 107 |
| Tabela 10 Resumo dos resultados dos métodos de calibração de sensores capacitivos estudados | 111 |

Lista de Equações

| | |
|--|----|
| Equação 1 Relação entre Carga, Tensão e Capacidade de um Condensador | 1 |
| Equação 2 Capacidade Total do Sensor | 6 |
| Equação 3 Determinar a coordenada das abcissas da posição do toque..... | 8 |
| Equação 4 Capacidade | 9 |
| Equação 5 Aproximação Linear da Tensão aos Terminais de uma Capacidade | 13 |
| Equação 6 Resistência Equivalente..... | 14 |
| Equação 7 Tensão à entrada da ADC | 20 |
| Equação 8 Tensão à entrada da ADC..... | 21 |
| Equação 9 Impedância equivalente à Indutância | 25 |
| Equação 10 Impedância equivalente à Capacidade..... | 25 |
| Equação 11 Corrente Média Consumida..... | 31 |
| Equação 12 Modelo Matemático de um Filtro FIR..... | 34 |
| Equação 13 Modelo Matemático de um Filtro IIR..... | 34 |
| Equação 14 Modelo Matemático de um Filtro Digital Passa-Baixo <i>Butterworth</i> | 35 |
| Equação 15 Cálculo da Posição do Dedo num Sensor Capacitivo..... | 37 |
| Equação 16 Calculo da Posição Final | 37 |
| Equação 17 Constante de Tempo | 43 |
| Equação 18 Lei de Ampère-Maxwell na forma diferencial | 54 |
| Equação 19 Lei de Ampère-Maxwell na forma integral | 54 |
| Equação 20 Relação Sinal-Ruído | 59 |
| Equação 21 Equação que rege o valor de tensão na entrada positiva do comparador C1 | 63 |

Lista de Acrónimos

| | |
|-------------|--------------------------------------|
| ADC | <i>Analog to Digital Converter</i> |
| FIR | <i>Finite-Impulse Response</i> |
| GND | <i>Ground</i> |
| ICSP | <i>In-Circuit Serial Programming</i> |
| IIR | <i>Infinite-Impulse Response</i> |
| PCB | <i>Printed circuit board</i> |
| RF | <i>Radiofrequência</i> |
| SNR | <i>Signal-to-Noise Ratio</i> |

1. Introdução

1.1. Âmbito e Motivação

O trabalho apresentado neste documento foi desenvolvido no âmbito do projeto de dissertação de final de curso do Mestrado Integrado em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro.

Os sensores capacitivos para deteção do toque são utilizados numa ampla gama de equipamentos, desde telemóveis, *tablets*, fogões, entre outros. Sendo a *Exatronic* uma empresa especializada na investigação, conceção, desenvolvimento e industrialização de soluções inovadoras nas Tecnologias de Informação, Comunicação e Eletrónica, pretendem efetuar um estudo sobre este género de sensores de forma a adquirir conhecimento sobre a possibilidade da sua integração nos seus projetos industriais.

Para o aluno é particularmente motivador a possibilidade de ser acolhido numa equipa multidisciplinar com vários anos de experiência no desenvolvimento de projetos eletrónicos com uma cultura de partilha do conhecimento.

1.2. Enquadramento Tecnológico

Um transdutor capacitivo funciona pelo princípio da capacidade eletrostática. Numa configuração simplista, um condensador pode ser definido como um dispositivo elétrico constituído por duas placas condutoras posicionadas paralelamente entre si, separadas por um meio dielétrico e que armazena energia sob a forma de campo elétrico, sendo caracterizado por uma capacidade C . Imagine-se que o condensador se encontra carregado com uma carga Q . Isso faz com que apresente aos terminais uma diferença de potencial de V . A relação entre a carga Q acumulada num condensador e a tensão V aos seus terminais define a capacidade C desse condensador.

Equação 1 Relação entre Carga, Tensão e Capacidade de um Condensador

$$Q = C \times V$$

A capacidade C de um condensador de placas paralelas depende da área S , da distância entre as placas d e do meio dielétrico entre as placas (Figura 1).

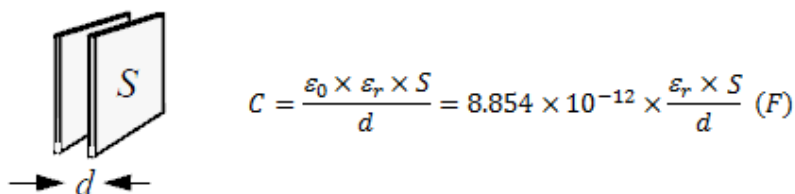


Figura 1 Capacidade formada por 2 placas condutoras em paralelo

Quando usado como um dispositivo sensorial, o transdutor capacitivo exibe uma alteração no valor nominal da capacidade em função da grandeza física a medir. A sua sensibilidade ao mundo exterior pode ocorrer devido a diferentes fatores: através da alteração do meio dielétrico (ϵ) que separa os condutores, ou pela variação da distância (d) entre esses condutores ou ainda pela alteração da área (S) destes [1].

A escolha da propriedade sensível ao exterior depende do tipo de aplicação e dos seus requisitos quanto à gama de funcionamento, tolerância, coeficiente de temperatura, linearidade, elementos parasitas e a sua respetiva resposta em frequência [2].

Os sensores capacitivos podem ser parte integrante de placas de circuito impresso (PCB) ou de *microchips* e serem capazes de oferecer a capacidade sensorial sem a necessidade de contacto com a grandeza física a medir e com uma resolução extremamente elevada. São usados para medir grandezas como a posição, deslocamento, velocidade e a aceleração de um determinado objeto, medem a humidade, são capazes de determinar o nível de um fluido, medem a força, pressão e a temperatura e são também detetores de proximidade objetos (metálicos e não metálicos), entre muitas outras aplicações [2]. A sua utilização nos sistemas anteriormente referidos está relacionada com o seu baixo consumo energético, a sua grande sensibilidade e resolução e o seu reduzido custo de produção [3]. Contudo, têm elementos parasitas e necessitam de circuitos específicos e relativamente complexos para a sua leitura.

Neste trabalho de dissertação pretende-se identificar condições de utilização de sensores capacitivos e, como aplicação dos resultados obtidos, desenvolver um demonstrador da tecnologia capacitiva para deteção do toque. Esse demonstrador é baseado num comando do tipo régua cujo valor da saída irá alimentar uma régua de iluminação a leds. Os sensores capacitivos são fixos dentro de um suporte de plástico, com aproximadamente 2 milímetros de espessura. O suporte de plástico é colado a um vidro, com aproximadamente 4 milímetros de espessura. No futuro, esse demonstrador poderá ser utilizado como um comando de regulação.

1.3. Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo principal a identificação de condições de utilização de sensores capacitivos, desde materiais, algoritmos de validação da deteção do toque, geometria e área do sensor, deteção do movimento. É dada relevância a métodos de serigrafia para o desenho do sensor de forma a construir aplicações que sejam esteticamente apelativas para o utilizador, obtendo-se conhecimento sobre o comportamento esperado em função do material e da espessura. Como aplicação dos resultados obtidos, desenvolveu-se um demonstrador de tecnologia capacitiva para deteção do toque.

Para se atingir o objetivo, realizaram-se as seguintes etapas:

- Estudo do estado da arte de sensores capacitivos, vantagens e limitações;
- Especificação dos requisitos dos sensores;
- Identificação das diferentes características do meio físico que melhora o desempenho do sensor;
- Especificação da arquitetura e desenho do sensor;
- Desenvolvimento e implementação do sistema (*hardware* e *firmware*);
- Realização de testes em diferentes materiais e condições;

- Teste e validação do sistema final

1.4. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está organizada em capítulos com os conteúdos que a seguir se enumeram.

No capítulo 1 aborda-se o âmbito e a motivação para o projeto, enquadra-se o projeto na tecnologia, define-se o objetivo principal e as etapas que se realizaram até o atingir e expõe-se a estrutura do documento.

No capítulo 2 é apresentado o estado da arte, ou seja, é explicado o que são sensores capacitivos e como funcionam, são apresentadas algumas das soluções e fabricantes existentes no mercado e são expostas as vantagens e as limitações conhecidas dos sensores.

No capítulo 3 apresentam-se os conjuntos de desenvolvimento adotados para a realização do trabalho de dissertação. É explicada a sua escolha e o funcionamento de *hardware* e de *firmware* utilizados em cada conjunto de desenvolvimento.

O capítulo 4 constitui a secção dedicada ao trabalho experimental executado, os resultados obtidos das experiências e a análise crítica desses resultados para o conjunto de desenvolvimento da *Microchip*.

O capítulo 5 constitui a secção dedicada ao trabalho experimental executado, os resultados obtidos das experiências e a análise crítica desses resultados para o conjunto de desenvolvimento da *Atmel*.

No capítulo 6 apresentam-se os protótipos (*hardware* e *firmware*) de uma aplicação final proposta pela *Exatronic*: um demonstrador de tecnologia baseado num comando do tipo régua capacitiva.

O capítulo 7 diz respeito às conclusões que se atingiram com a realização do projeto de dissertação, o que se ganhou com o trabalho realizado e são apresentadas sugestões para o trabalho futuro.

2. Estado da Arte: Sensores Capacitivos na Detecção do Toque Humano

Hoje em dia botões, teclados, entre outros, são na sua maioria construídos com uma base tecnológica mecânica. Contudo, há cada vez mais aplicações a serem lançadas para o mercado utilizando a tecnologia capacitiva em detrimento da mecânica. Os ecrãs de toque (mais conhecidos pelo inglês *touch screens*) constituem uma das maiores aplicações desta tecnologia assim como a implementação de botões ou réguas capacitivas. Telemóveis, leitores de mp3, comandos de televisão, controlos remotos, teclados de comando de máquinas industriais são apenas algumas das aplicações onde já são usados sensores capacitivos.

Embora haja a necessidade de algum *hardware* adicional, os sensores capacitivos são mais versáteis, precisos, robustos e ocupam menos espaço comparativamente aos mecânicos. Não se desgastam com o tempo e uso e as suas aplicações possuem uma estética mais elegante. Uma vez que estão “protegidos” por uma superfície de toque, as sujidades que se vão acumulando podem ser facilmente removidas.

2.1. Princípio de Funcionamento

Graças aos transdutores capacitivos é possível construir botões sem necessidade de recorrer a qualquer componente mecânico. A intensidade do sinal destes botões muda com o toque devido à capacidade elétrica do corpo humano.

2.1.1. Capacidade Própria

Imagine-se que se tem 2 condutores separados por um meio dielétrico, onde um dos condutores se encontra acoplado à *terra* e o outro alimentado por uma tensão contínua V (por exemplo 5V), tal como é demonstrado na Figura 2.

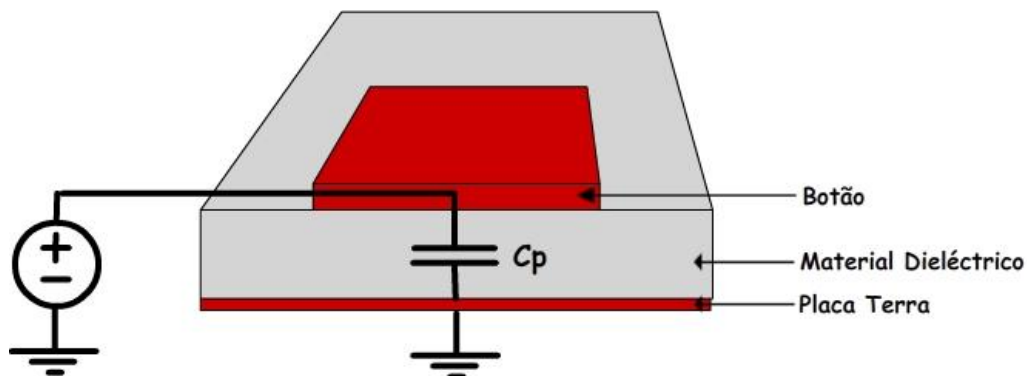


Figura 2 Transdutor Capacitivo com uma Capacidade Base C_p

Devido à aplicação de uma tensão V , é acumulada carga nas placas do condensador caracterizado pela capacidade C_p . Como consequência da tensão aplicada surge um campo elétrico. A maior parte da força desse campo elétrico está contida entre as placas, sendo que a restante parte está presente na proximidade destas.

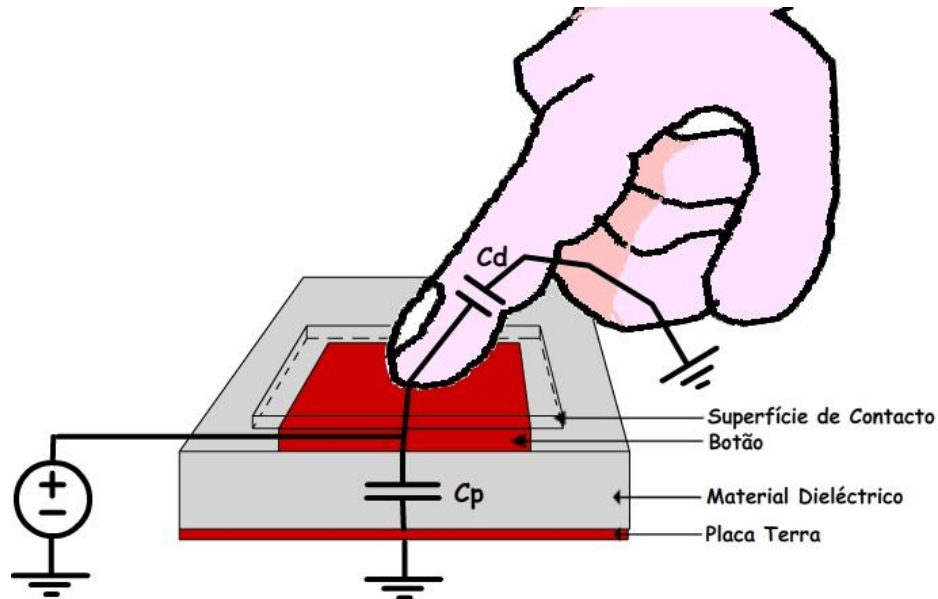


Figura 3 Toque Humano no Transdutor

O toque de um dedo humano na superfície de contacto do transdutor capacitivo influencia o campo elétrico que existe na sua proximidade, formando uma nova capacidade C_d em paralelo com a capacidade formada pelos condutores metálicos do transdutor, como se vê na Figura 3. Essa capacidade criada pelo nosso dedo resulta essencialmente da água presente no nosso corpo e dos átomos de ferro existentes na nossa corrente sanguínea [4]. Devido à existência desses átomos são formados condensadores em cada superfície de contacto do nosso corpo com o transdutor. A capacidade formada pelo dedo está acoplada à *terra*. Obtém-se assim duas capacidades em paralelo, ou seja, a capacidade dos condutores metálicos e a capacidade formada entre o condutor metálico e o dedo, resultando na capacidade total do sensor C_s .

Equação 2 Capacidade Total do Sensor

$$C_s = C_p + C_d$$

Da expressão anterior, podemos concluir que é importante garantir um predomínio por parte da capacidade formada pelo dedo face à capacidade base do sensor pois torna as variações de C_d mais influentes na capacidade total do sensor.

Sensores capacitivos baseados em alterações na capacidade própria são usualmente utilizados na construção de botões ou na determinação da posição do dedo a uma dimensão (1D), como por exemplo nas régua capacitivas digitais usadas em aplicações como o controlo de volume ou de luminosidade.

2.1.2. Capacidade Mútua

Num princípio de funcionamento com base na capacidade mútua (C_m), são usados na superfície de toque duas camadas condutoras (camada condutora A e camada condutora B), separadas por um intervalo muito estreito, sendo a presença do dedo detetada pela alteração do meio dielétrico e não por alteração da capacidade própria (C_p) de cada transdutor capacitivo.

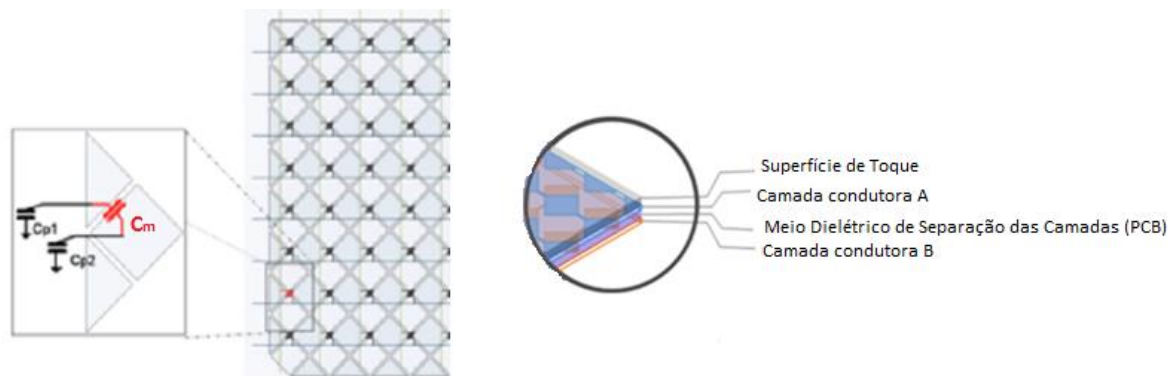


Figura 4 Capacidade Mútua

Quando ocorre um toque, a capacidade mútua (C_m), que resulta da interação entre os transdutores capacitivos da camada A e os da camada B, é reduzida devido à alteração do campo elétrico (Figura 5 [5]). A redução desta capacidade (C_m) é usada para a detecção do toque na superfície.

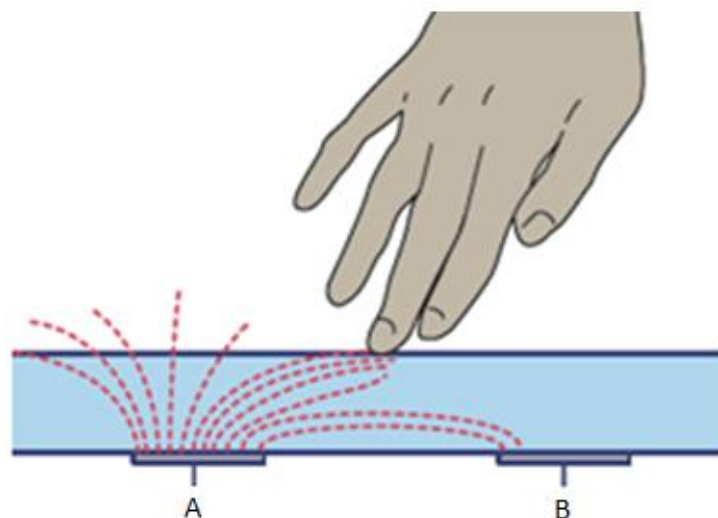


Figura 5 Variação da Capacidade devido ao Toque

Os sensores capacitivos baseados na variação da capacidade mútua são vulgarmente utilizados na detecção do toque a duas dimensões, como por exemplo nos ecrãs tácteis dos telemóveis. Como a capacidade mútua resulta de uma interação entre qualquer um dos sensores capacitivos constituintes do ecrã, é possível determinar com precisão a posição (X,Y) do dedo.

Atenda-se ao seguinte exemplo onde é apresentado um método muito simplista para se determinar a posição do toque num ecrã capacitivo. Em primeiro lugar, para determinar a posição é necessário que o sistema possua o conhecimento de um valor de referência da capacidade de cada sensor. Esse valor de referência é, normalmente, uma média obtida ao longo do tempo da capacidade do sensor, permitindo que a referência se vá adaptando às alterações do ambiente, como mudanças de temperatura, entre outras. Subtraindo as referências aos valores atuais das capacidades dos sensores, obtém-se a tabela apresentada na Figura 6 [6].

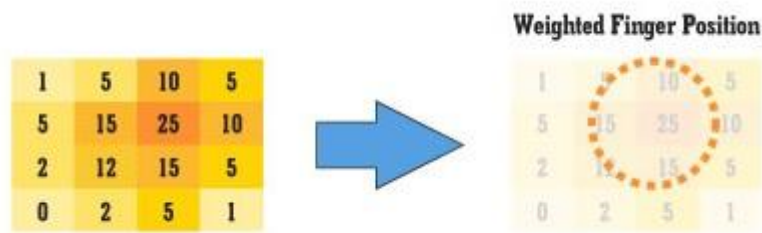


Figura 6 Posição do dedo baseado na alteração da capacidade mútua de sensores

Uma forma simples de calcular a posição do toque baseia-se na determinação do centro de massa, isto é, calcula-se a posição do dedo baseado na variação da capacidade mútua e no peso atribuído a cada sensor. Fazendo o cálculo do centro de massa para a coordenada X recorrendo à segunda linha da tabela obtém-se o seguinte resultado:

Equação 3 Determinar a coordenada das abcissas da posição do toque

$$X = \frac{5 \times 1 + 15 \times 2 + 25 \times 3 + 10 \times 4}{5 + 15 + 25 + 10} = \frac{150}{55} = 2,73$$

Calculada a posição do toque, enviam-se os dados para serem processados e se efetuar a tarefa pretendida.

2.1.3. Superfície Capacitiva

Considere-se que se tem uma superfície de vidro uniformemente revestida com uma camada condutora. Durante o normal funcionamento da superfície capacitiva, é aplicado um sinal de tensão nos quatro cantos da superfície formando um campo electrostático uniforme. Quando há um toque, forma-se uma capacitância entre o dedo e a superfície. Dependendo da localização do toque na superfície, a corrente elétrica fornecida pelos quatro cantos é diferente, assim como a capacitância vista por estes também é diferente. Essas diferenças permitem e são usadas para a determinação exata do toque na superfície capacitiva. Este método embora possua as vantagens da tecnologia capacitiva é ligeiramente suscetível a falsos toques e necessita de uma calibração especial no processo de produção (é necessário garantir que a camada condutora é vista uniformemente nos quatro cantos da superfície quando não há toque) [5].

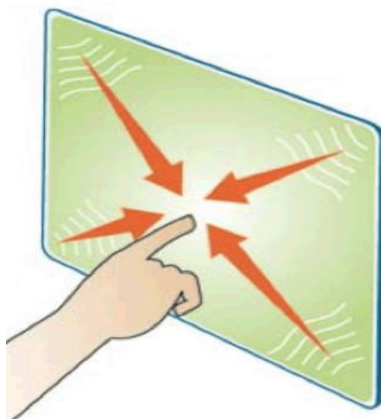


Figura 7 Superfície Capacitiva [6]

2.2. Construção de um Transdutor Capacitivo

2.2.1. Geometria e Área do Transdutor

Quando se projeta um botão capacitivo, em geral, a geometria do transdutor do sensor não constitui um fator muito relevante, embora seja aconselhado pelos fabricantes a utilização de geometrias aproximadamente arredondadas, maximizando a área de interação com o toque uma vez que a forma do dedo é aproximadamente circular. Fabricantes como a *Cypress Semiconductor* referem ainda que geometrias pontiagudas são mais sensíveis nos extremos comparativamente às restantes zonas, levando à existência de algumas não linearidades. As zonas pontiagudas são zonas que radiam campos eletromagnéticos relativamente fortes, causadores de ruídos e de deficiências em alguns sistemas [7]. Apesar do que é dito anteriormente, a área é o parâmetro essencial a ter em conta na questão da sensibilidade ao toque, tal como podemos ver pela Equação 4.

Equação 4 Capacidade

$$C = \frac{\varepsilon \times S}{d} (F), \text{ onde } \varepsilon = \varepsilon_0 \times \varepsilon_r$$

C é a capacidade:

S é a área das placas condutoras,

d é a distância entre as placas condutoras,

ε é a permissividade elétrica ($= \varepsilon_0 \times \varepsilon_r$):

ε_0 é a permissividade no vácuo (8.854×10^{-12} (F/m));

ε_r é a permissividade relativa do meio material dielétrico.

Quanto maior a área, maior será a capacidade e, conseqüentemente, melhor será a sua sensibilidade. Por outras palavras, quanto maior a área, maior será a variação do valor da capacidade devido à presença de um dedo, permitindo uma melhor deteção do toque. Contudo, o incremento de S leva ao aumento da capacidade C_p e, desde que as suas dimensões se encontrem dentro da zona de contacto, de C_d . Tendo em consideração a Equação 2, a área S tem de possuir uma dimensão de compromisso, isto é, tem de ser suficientemente grande para maximizar C_d e suficientemente pequena para minimizar C_p . Uma boa regra para o dimensionamento do transdutor consiste em dimensioná-lo para que tenha dimensões, pelo menos, 4 vezes superiores à espessura da superfície de revestimento (superfície de toque) [8]. Normalmente a área utilizada é aproximadamente o tamanho médio de um dedo de um adulto, 12.7 milímetros por 12.7 milímetros [9].

2.2.2. Separação entre Transdutor e Ligações à Terra

Para que o sistema se torne imune a perturbações do ambiente, como interferências eletromagnéticas, é comum utilizar planos de *terra* tanto na camada superior como na camada inferior do PCB. Contudo, se a distância d entre o transdutor e o plano de *terra* for muito pequena, a capacidade C_p será elevada, tornando a capacidade total do sensor (ver Equação 2) pouco sensível às variações de C_d . Há, portanto, perda de sensibilidade ao toque por parte do sensor.

É importante manter os planos de *terra* afastados do transdutor para que a perda de sensibilidade seja mínima mas, ao mesmo tempo, é importante mantê-los juntos para que se

obtenha imunidade às perturbações do ambiente. Há necessidade de encontrar um meio-termo em que se garanta imunidade às perturbações sem perda significativa de sensibilidade.

Aconselha-se que numa situação em que os planos de *terra* e os transdutores capacitivos se encontrem na mesma camada tenham um afastamento entre si de uma a duas vezes a espessura da superfície de toque e que planos de *terra* da camada oposta aos transdutores não passem diretamente por baixo destes, como se encontra demonstrado na Figura 8 [10].

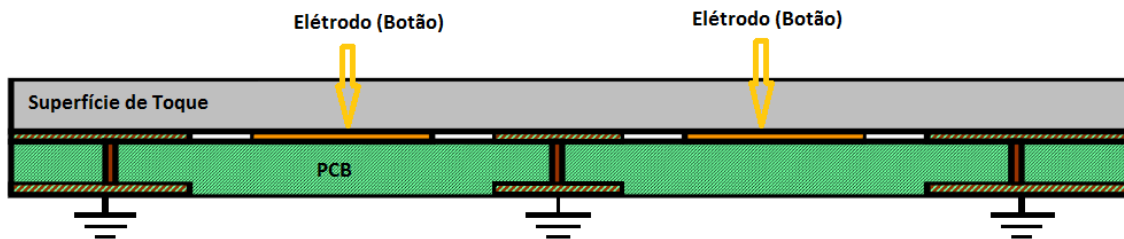


Figura 8 Distribuição dos planos de *terra* nas camadas do PCB

2.2.3. Proximidade entre Sensores Capacitivos

Na construção de um teclado capacitivo, a proximidade entre os vários botões possui bastante importância. Quando uma pessoa toca num dos botões capacitivos forma-se uma capacidade entre o dedo e o respetivo transdutor mas também se formam capacidades entre o dedo e os transdutores dos botões adjacentes (efeito denominado de *crosstalk*) [10]. Logo, é desejável que essas capacidades “extra” tenham o menor impacto possível no sistema (para se evitar a deteção de falsos toques). Para se atingir esse objetivo, os diferentes transdutores devem encontrar-se suficientemente afastados, uma vez que segundo a Equação 4 a capacidade é inversamente proporcional à distância. Normalmente um afastamento de 4.7mm [9] é suficiente. Uma forma alternativa para melhor “isolar” botões adjacentes será adicionar pequenos caminhos de *terra* entre estes. Soluções de *software* como o ajuste dos limiares de decisão (pressionado ou não) ou algoritmos que detetem o botão mais pressionado podem também resolver este problema, contudo limitam as capacidades do sistema.

2.2.4. Superfície de Toque

A parte ativa do sensor no corpo metálico que constitui uma das placas do condensador (definida como botão na Figura 3) é normalmente revestida por uma superfície isolante, denominada superfície de toque (ou contacto), para proteger o transdutor contra poeiras e outras sujidades. A espessura e a composição dessa superfície afeta diretamente a sensibilidade do sensor ao toque.

O vidro ou o acrílico são alguns dos materiais normalmente utilizados devido à sua alta constante dielétrica e por permitirem a construção de superfícies bastante finas.

Tabela 1 Propriedades Dielétricas [8]

| Material | Constante Dielétrica |
|---------------|----------------------|
| Vácuo | 1 |
| Ar | ≈ 1 |
| Papel | 2 |
| Acrílico | 2.1 – 3.9 |
| Polycarbonato | 2.9 – 3 |
| Borracha | 3 |
| Nylon | 3 |
| Mica | 4 – 8 |
| FR4 | 4.1 – 5.3 |
| Vidro | 3.7 – 10 |
| Silício | 11 – 12 |
| Água | 80 (a 20 °C) |

Do ponto de vista dos sensores capacitivos, quanto mais fina esta superfície for, melhor será a precisão do sensor e maior sensibilidade possuirá o sistema. Isto pode-se explicar partindo novamente da Equação 4. A capacidade C_d formada entre o dedo e o transdutor é inversamente proporcional à distância, logo, quanto mais fina for a superfície, menor será a distância entre o dedo e o transdutor e, consequentemente, maior será a capacidade C_d .

Como superfícies de toque não se devem utilizar materiais condutores (como os metais) porque nestes são geradas cargas que se movem livremente através da superfície, inviabilizando o uso dos sensores.

A superfície de toque pode ainda ser útil no isolamento entre botões adjacentes. Por outras palavras, podem-se criar “espaços” de ar (o ar possui uma constante dielétrica inferior comparativamente ao vidro ou ao acrílico) no material de revestimento entre os transdutores.

2.2.5. Colas

Para unir o sensor capacitivo à superfície de toque é necessário usar materiais aderentes (colas) que influenciam inevitavelmente o desempenho do sistema. A afirmação anterior é justificada recorrendo à Equação 4, ou seja, as colas são parte constituinte do meio dielétrico que está compreendido entre o transdutor e o dedo, tendo um impacto direto no valor da capacidade criada pelo dedo. Para além disso, é muito difícil criar uma superfície de cola completamente lisa, isto é, há uma forte probabilidade de se criarem bolhas de ar. Se existirem bolhas de ar entre o transdutor e a superfície de toque, a capacidade criada devido à presença do dedo terá um valor muito reduzido devido à baixa permissividade relativa ϵ_r do ar. Por exemplo, um buraco de ar com 1mm pode reduzir a sensibilidade ao toque do sistema a um quarto ou mesmo a metade [10].

Assim sendo, na utilização de colas sabe-se que quanto maior for a espessura formada pela cola menor será a sensibilidade ao toque. Deve-se seguir as instruções fornecidas pelo fabricante, nomeadamente nas questões ambientais que alteram as propriedades da cola e que influenciam a resposta da aplicação, deve-se ter cuidado com a existência de bolhas de ar, pelos motivos já

explicados anteriormente, e deve haver o cuidado de garantir que a aderência à superfície do toque e ao transdutor (PCB) seja feita de uma forma eficiente, garantindo que durante o tempo de vida útil da aplicação não haja descolagem do material.

2.2.6. Interligação de Componentes

Por fim, deve-se prestar atenção às ligações dos transdutores aos dispositivos eletrônicos que receberão a informação proveniente destes. Essas ligações devem ter sempre o menor comprimento possível, devem estar afastadas da *terra* e afastadas de outras ligações com o objetivo de minimizar a criação de capacidades parasitas e o acoplamento dos vários sensores. É também aconselhável que as ligações de um sensor não passem por baixo de outros sensores pelas mesmas razões já enunciadas.

Se na construção do PCB for possível o uso de várias camadas, aconselha-se que as ligações entre os transdutores e o dispositivo eletrônico de controlo sejam feitas numa camada diferente das restantes ligações existentes (de alimentação, comunicação, entre outras). Deve-se sempre evitar o cruzamento de ligações mas, se tal não for possível, este deve ser feito de uma forma ortogonal para se minimizar o efeito de *crosstalk*.

2.3. Técnicas de Medida da Capacidade

A maneira como o transdutor se encontra ligado eletricamente ao resto do sistema é um aspeto de extrema importância num sistema capacitivo. É necessária a estruturação de um circuito capaz de ler as mudanças de capacidade do transdutor. A sua construção deve ter em consideração os requisitos da aplicação, nomeadamente a precisão, o custo, o espaço disponível e as perturbações ambientais a que o circuito irá estar sujeito. Existe um grande número de métodos para medir o valor de uma capacidade: pela variação da frequência de ressonância, modelação em frequência, análise da amplitude do sinal, medida de tempos de carga ou descarga, medida do atraso temporal, por transferência de carga, análise do *duty cycle*, etc.

São de seguida apresentadas algumas das soluções mais usadas pelos fabricantes de teclados capacitivos (Tabela 2). O desmodulador síncrono, embora seja muito pouco utilizado neste tipo de aplicação, é uma solução de interesse para aplicações que exijam maior exatidão e flexibilidade de leitura [2].

Tabela 2 Técnicas de Medida da Capacidade usadas pelos Fabricantes

| Fabricantes | DC Direto | Transferência de Carga Acumulada | Circuito RC |
|-------------------|-----------|----------------------------------|-------------|
| Microchip | X | | X |
| Cypress | | X | |
| Texas Instruments | X | | X |
| NXP | X | | |
| Silicon Labs | X | | |
| Atmel | | X | |
| STM | | X | |
| Fujitsu | | | X |
| Atmel | | X | |

Existem, no entanto, outras soluções que não serão referidas devido ou à sua baixa aplicabilidade no mercado ou porque resultam de modificações das apresentadas.

2.3.1. DC Direto

No caso de DC direto, a determinação do nível da saída do transdutor é baseado na leitura da tensão presente aos terminais da capacidade deste. Pode-se descrever o método de funcionamento deste da seguinte forma: é aplicado ao transdutor capacitivo uma corrente elétrica de valor constante (I). O valor aproximado da tensão final resultante pode ser dado pela seguinte equação linear.

Equação 5 Aproximação Linear da Tensão aos Terminais de uma Capacidade

$$V = \frac{I \times T}{C}$$

T é o tempo de carga do transdutor, C a capacidade do transdutor e V é a tensão aos terminais do condensador, que vai ser lida numa ADC.

Se fixarmos o tempo de carga do transdutor T num período pré-estabelecido e fixarmos a corrente fornecida, a tensão produzida no transdutor dependerá apenas da capacidade. A ADC vai então ler o valor da tensão que está presente aos terminais da capacidade. Assim, quando a capacidade de um dedo humano é adicionada à capacidade do transdutor, como I e T são constantes, vai resultar numa diminuição da tensão à entrada da ADC. Esta é uma das soluções utilizadas pela *Microchip* para ler transdutores capacitivos.

A *NXP* utiliza o mesmo princípio mas aplicado ao ciclo de descarga, isto é, procede-se à carga total do condensador. Posteriormente descarrega-se o condensador durante um período de tempo fixo e lê-se o valor de tensão presente nos terminais deste. A presença do dedo humano resultará que no final do tempo de descarga, o valor de tensão presente aos terminais da capacidade será superior comparativamente à ausência de toque.

Estes métodos exigem um valor de corrente para a carga ou descarga do transdutor baixa e de muito alta precisão. É necessário ainda que a impedância de entrada da ADC seja muito alta (idealmente infinita) [11]. Uma vez que estes requisitos são impossíveis de atingir, este circuito é bastante vulnerável a ruídos e portanto, é apenas aplicável a situações em que não seja necessária grande precisão de leitura.

2.3.2. Transferência de Carga Acumulada

2.3.2.1. Circuito *Switched-Capacitor*

Um sistema de *switched-capacitor* utilizado pela *Cypress* converte a capacidade do transdutor no seu equivalente resistivo [12].

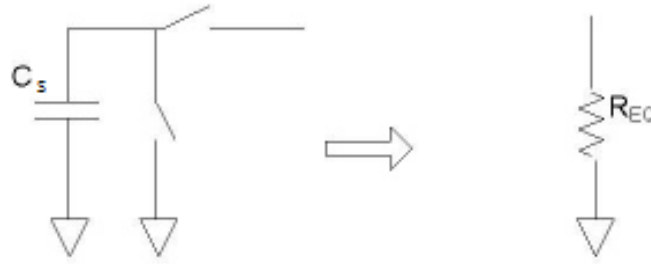


Figura 9 Conversão C_S - R_{eq}

O valor da resistência equivalente é inversamente proporcional à capacidade do transdutor multiplicada pela frequência de comutação (F_s):

Equação 6 Resistência Equivalente

$$R_{eq} = \frac{1}{C_S \times F_S}$$

O funcionamento do circuito apresentado na Figura 10 é descrito da seguinte forma: uma fonte de corrente (IDAC) carrega totalmente um condensador de valor conhecido notado por C_{mod} . Esse condensador é depois descarregado através da resistência equivalente R_{eq} . A corrente gerada no processo de descarga de C_{mod} é convertida por um modelador de sigma-delta (Comparador, IDAC e Control Logic) num sinal digital. Quando há um toque de um dedo no transdutor, a capacidade aumenta e a resistência equivalente diminui. Como resultado, a corrente de descarga que passa pela resistência equivalente irá ser maior [12].

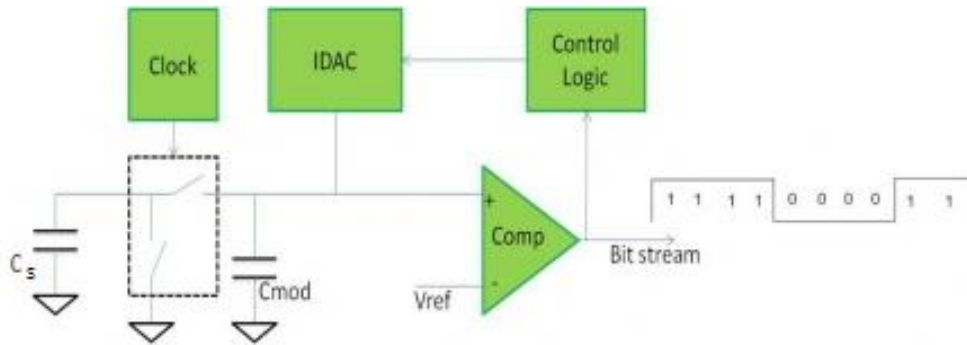


Figura 10 Circuito de leitura do transdutor capacitivo

A corrente elétrica é medida com o recurso a um comparador que compara o valor de tensão, proporcional à corrente e à resistência equivalente, presente na entrada positiva com um valor de referência presente na entrada negativa. Na saída do comparador é gerado um *bit stream* ('1' -> V_{DD} ¹ ou '0' -> V_{SS} ²), resultante da comparação, que alimenta um *Timer*. Este *Timer* dá-nos a indicação da variação do valor da capacidade do transdutor pela variação do *duty cycle* do *bit stream*, isto é, mede a quantidade de tempo que o *bit stream* se encontra a '1' durante um período de medição. Quando a entrada positiva do comparador é inferior ao valor de referência, o *Timer* é

¹ Maior tensão de alimentação do comparador

² Menor tensão de alimentação do comparador

interrompido e faz-se a análise dos dados. Se o tempo medido pelo *Timer* for superior a um determinado limiar, é determinado a existência de um toque.

2.3.2.2. Transferência de Carga entre Capacidades

O circuito de leitura de transdutores capacitivos desenvolvido pela *STMicroelectronics* utiliza o princípio de transferência de carga entre a capacidade do transdutor e um condensador de valor conhecido (este condensador auxiliar tem normalmente um dimensão de 1000 a 10000 vezes superior à capacidade do transdutor) [13].

A capacidade do transdutor é carregada por uma fonte até um valor de tensão de referência estável. A carga é depois transferida para o condensador auxiliar de valor conhecido. Este processo é repetido o número de vezes necessário até que o valor de tensão presente aos terminais com condensador auxiliar atinja um valor de referência. O número de transferência necessária para que seja atingido essa tensão de referência é proporcional à capacidade do transdutor capacitivo.

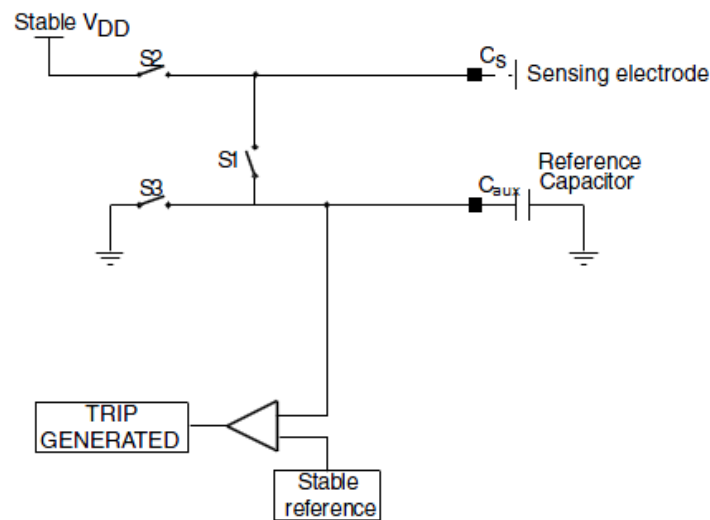


Figura 11 Diagrama do circuito de leitura

Tabela 3 Sequência de Transferência de Carga

| Etapa | Switch 1 | Switch 2 | Switch 3 | Descrição |
|-------|----------|----------|----------|---------------------------------|
| 1 | 1 | 0 | 1 | Descarga de C_{aux} e C_s |
| 2 | 0 | 0 | 0 | Espera |
| 3 | 0 | 1 | 0 | Carrega C_s |
| 4 | 0 | 0 | 0 | Espera |
| 5 | 0 | 0 | 1 | Ciclo de Transferência de Carga |
| 6 | 0 | 0 | 0 | Espera |
| 7 | 1 | 0 | 1 | C_s descarrega |

As etapas de 2 a 7 repetem-se até a tensão aos terminais de C_{aux} atingir um valor de referência [13].

O método de aquisição utilizado pela *Atmel* utiliza o mesmo princípio que o da *STMicroelectronics*.

2.3.3. Circuito RC

2.3.3.1. Oscilador RC

A *Microchip* e a *Texas Instruments* determinam a capacidade do transdutor através de um oscilador RC. O oscilador RC funciona como um oscilador livre que converte alterações da capacidade do transdutor em variações de frequência de oscilação.

Um exemplo prático é demonstrado na Figura 12 [14]. Neste exemplo, para além do circuito RC, é utilizado ainda um comparador (integrado no microcontrolador MSP430) e um conjunto de 3 resistências para a definição da tensão de referência do comparador.

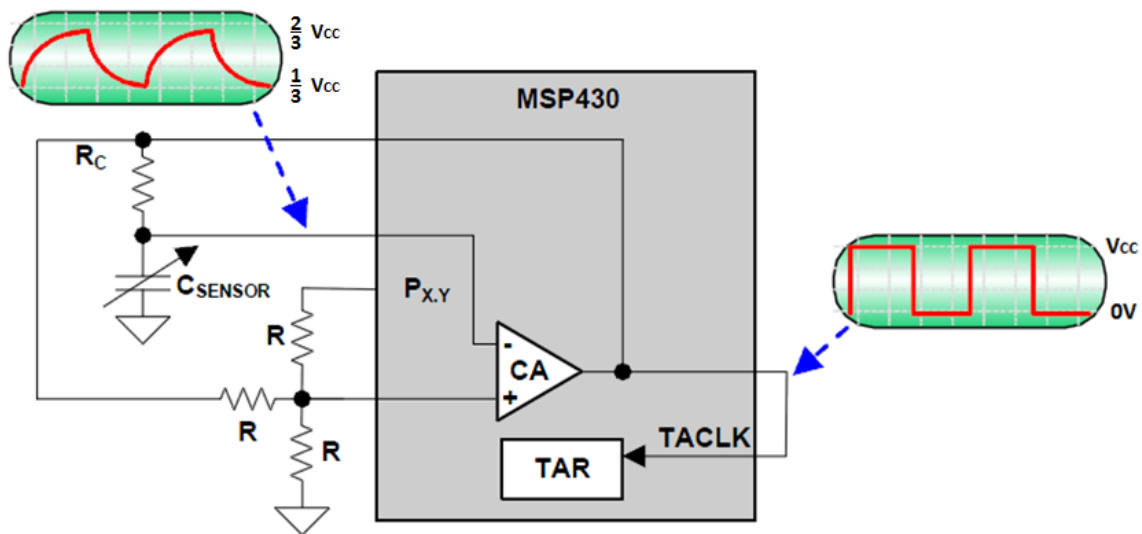


Figura 12 Exemplo da *Texas Instruments* para o Oscilador RC

A variação do valor da capacidade do transdutor traduz-se numa mudança na frequência da onda presente à saída do comparador. Ou seja, o efeito do toque humano traduz-se no aumento da capacidade e consequentemente na diminuição da frequência de oscilação do circuito. Esta frequência é medida e analisada utilizando um Timer do MSP430.

O divisor resistivo formado pelas resistências R , quando a saída $P_{X,Y}$ do MSP430 se encontra no estado lógico alto, produz uma tensão de referência na entrada positiva do comparador. O valor dessa tensão varia consoante a saída do comparador, isto é, considerando que o valor das resistências do divisor é o mesmo e que a saída do comparador tem uma excursão de $0V$ a V_{CC} , utilizando a Lei de Kirchhoff para as correntes facilmente se determina que quando a tensão à saída do comparador é V_{CC} , na entrada positiva existe uma tensão de referência de $\frac{2}{3}V_{CC}$, quando a tensão de saída do comparador é de $0V$, na entrada positiva há uma tensão de referência de $\frac{1}{3}V_{CC}$.

Medindo o número de períodos de oscilação durante um intervalo de tempo fixo, é possível determinar a frequência de oscilação do circuito e medir a capacidade do transdutor.

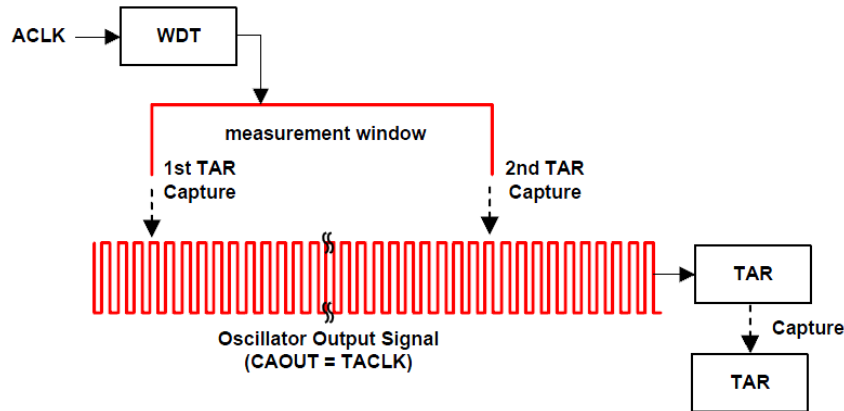


Figura 13 Princípio para determinação da frequência de oscilação

Na Figura 13 [14] está demonstrado o princípio para determinação da frequência de oscilação. Quando é gerada uma interrupção por WDT (*Watchdog Timer*), é lançado um contador à frequência de oscilação do circuito. O registo deste contador do Timer é definido na figura por TAR. Após um período de tempo fixo (*measurement window*) é gerado uma segunda interrupção onde é lido o valor do registo do contador (TAR). Por análise desse registo é possível determinar a ocorrência ou não de um toque.

Este método é de simples aplicação e mais preciso que o DC direto, possuindo a robustez suficiente para a maioria das aplicações. Contudo, variações nas resistências (devido a alterações de temperatura) e capacidades parasitas nos cabos de ligação dos componentes levam a que sistema com requisitos mais exigentes seja aconselhável a utilização de circuitos mais precisos.

2.3.3.2. RC-delay Line

Este método utilizado pela *Fujitsu* usa duas linhas de RC-delay e um conversor digital (Figura 14 [15]). Uma das linhas é usada como referência e a outra como circuito RC para medida da capacidade do transdutor C_S . Ambas as linhas são alimentadas pelo mesmo sinal de relógio (CLK), normalmente com uma frequência na zona das dezenas de KHz [15].

Dependendo do valor da capacidade existente em cada linha (C_R é uma capacidade fixa de valor conhecido e C_S é a capacidade variável do transdutor) existe um desfasamento proporcional à capacidade entre os sinais de CLK_S , CLK_R e CLK.

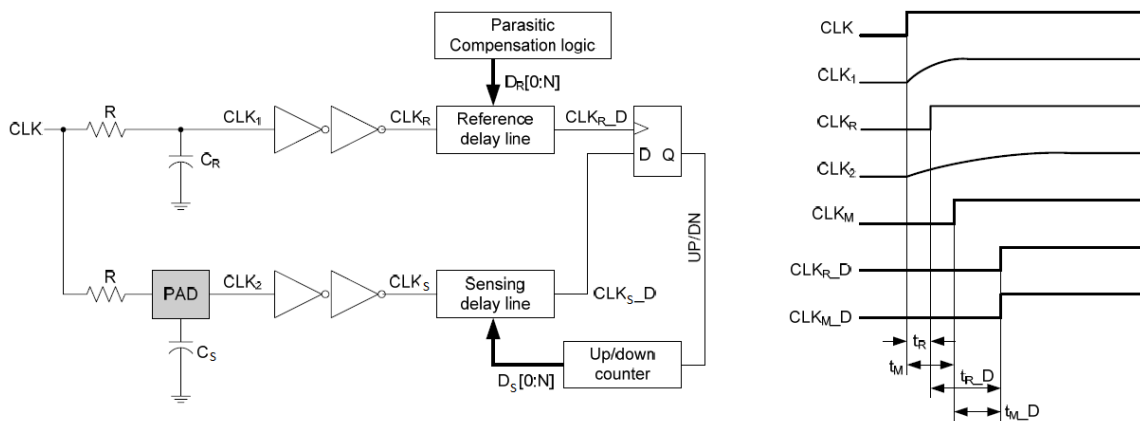


Figura 14 Diagrama de Blocos do Circuito de Leitura

Os sinais CLK_S e CLK_R estão ligados a um conversor digital (composto por: *Reference Delay Line*, *Sensing delay Line*, *Flip Flop*, *Up/down counter* e *Parasitic Compensation Logic*) que determina a diferença de fase entre os sinais. Os sinais digitais de controlo D_S e D_R estão configurados para que a saída dos blocos *Reference Delay Line* e *Sensing delay Line* estejam em fase. As saídas desses blocos, CLK_{S_D} e CLK_{S_R} , estão ligados a um *flip flop* que, por sua vez, se encontra ligado a um contador. Este contador configura em *run time* D_S para que CLK_{S_D} e CLK_{S_R} se encontrem sempre em fase. Comparando os sinais digitais de controlo D_S e D_R é possível determinar a diferença entre C_R e C_S . Assim, C_S é proporcional à diferença de $D_R[0:N] - D_S[0:N]$ (Figura 15 [15]).

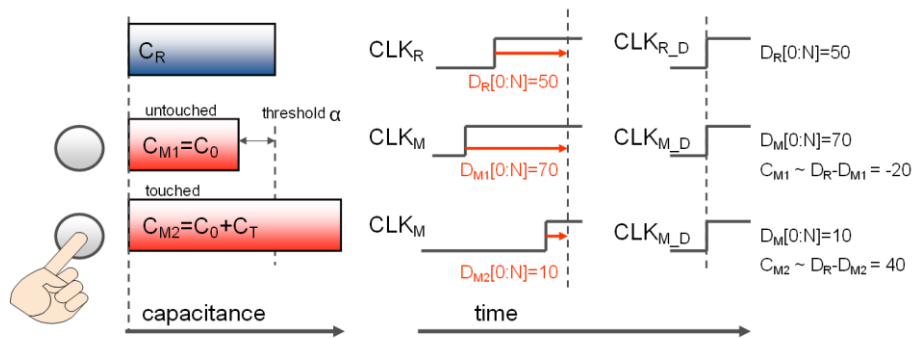


Figura 15 Diagrama temporal da determinação de toque

2.3.4. Desmodulador Síncrono

Este é o método mais flexível e exato de medir a capacidade do transdutor. A leitura deste envolve a excitação da capacidade com uma onda quadrada ou sinusoidal de alta frequência através de uma impedância conhecida. O sinal produzido na capacidade do transdutor é então amplificado e aplicado a um retificador de onda completa cuja saída se encontra ligada a um filtro passa baixo (Figura 16). Na saída do filtro estará um sinal DC igual ao valor médio do sinal retificado. Este valor DC é proporcional à capacidade do transdutor ou à sua impedância correspondente, dependendo da configuração do amplificador [2].

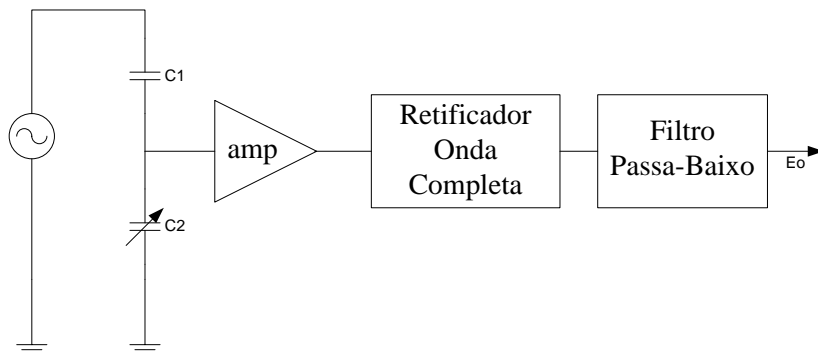


Figura 16 Desmodulador Síncrono

Embora produza resultados bastante precisos, este circuito é complexo e o seu custo de produção é superior às soluções anteriormente apresentadas.

2.4. Problemas e Limitações Associados a Sensores Capacitivos

2.4.1. Capacidades Parasitas

Denominam-se de capacidades parasitas as capacidades indesejadas que se formam entre componentes eletrônicos ou outros objetos condutores devido à sua proximidade. Estas capacidades indesejadas tornam a capacidade base do sensor elevada, diminuem a sua sensibilidade e, portanto, dificultam a determinação do nível da saída do sensor. No limite, o conjunto capacidades parasitas mais capacidade do transdutor pode chegar a representar cerca de 95% da capacidade total do sensor, deixando apenas 5% referentes à capacidade variável [16]. Existem ainda outros fatores a considerar como, por exemplo, a influência da superfície de toque na sensibilidade do sensor. Chega-se facilmente à conclusão que a percentagem da capacidade que varia com a presença/ausência do toque humano é muito pequena. Tendo em consideração que no mundo real esta tecnologia está empregue em sistemas sujeitos a vários tipos de ruído, a qualidade de deteção do toque será muito fraca.

A solução desenvolvida por alguns fabricantes como a *Azoteq* assenta no uso de *hardware* de compensação combinado com algoritmos de controlo (*Automatic Antenna Tuning Implementation* [16]) para o cancelamento destas capacidades parasitas. Esta compensação procura subtrair o valor da capacidade parasita gerada à capacidade total do sensor, deixando apenas “à vista” dos circuitos de leitura a capacidade variável do sensor. Por outras palavras, remove-se a forte componente DC do sinal, deixando apenas a componente AC [16]. Este tipo de abordagem permite maximizar a sensibilidade do sistema, permite melhorar o consumo e a relação sinal-ruído e permite ainda um maior grau de liberdade em certos parâmetros de construção do sensor como a espessura da superfície de contacto.

2.4.2. Água e Outros Líquidos

Os sensores capacitivos podem ser usados em equipamentos *outdoor* (caixas multibanco), sistemas de acesso público, dispositivos móveis (telemóveis, PDAs) ou em aplicações para cozinhas e casas de banho que se encontram muitas vezes expostos a água ou a chuva. A presença de água, ou de outro fluido com propriedades dielétricas semelhantes, sobre um sensor capacitivo constitui uma situação crítica³ no seu correto funcionamento. A presença de água dificulta a deteção verdadeira de um toque humano uma vez que esta tem um comportamento semelhante ao do dedo, gerando falsos toques. A solução passa pela distinção clara do que é um toque de um dedo humano da presença de água sobre o transdutor, procurando que estas situações produzam efeitos opostos no sensor.

Uma solução para este problema sugerida pela *Microchip* consiste em ligar um dos terminais do transdutor a uma fonte de alimentação e o outro à entrada de uma ADC [17].

³ Situação limite em que o sensor deixa de responder da maneira que o fabricante deseja.

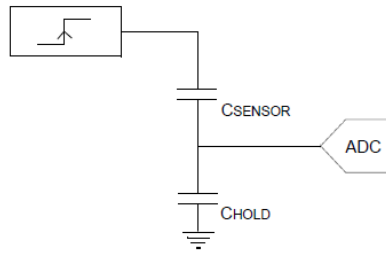


Figura 17 Circuito de Leitura sem toque

Na Figura 17 está representado um circuito alimentado por uma fonte cuja excursão vai de V_{SS} a V_{DD} , um transdutor capacitivo e uma ADC (C_{HOLD} é a capacidade de entrada existente na ADC). A leitura da capacidade do transdutor processa-se da seguinte forma: quando uma transição de V_{SS} para V_{DD} ocorre na saída da fonte ficará presente no terminal do transdutor capacitivo ligado à fonte uma tensão V_{DD} . Uma determinada quantidade de carga irá estar distribuída pelas duas capacidades (C_{SENSOR} e C_{HOLD}) formando um divisor.

A tensão formada entre as duas capacidades é proporcional à capacidade do transdutor e portanto pode ser lida pela ADC para determinação do valor desta (considera-se que a resistência de entrada da ADC é suficientemente grande para não ter efeito significativo):

Equação 7 Tensão à entrada da ADC

$$V_{ADC} = \frac{V_{DD} \times C_{SENSOR}}{C_{SENSOR} + C_{HOLD}}$$

Quando existe água sobre o transdutor, o acoplamento entre as suas duas placas constituintes vai ser fortalecido. Como a constante dielétrica da água é muito elevada (Tabela 1), cria-se um “novo caminho” por onde o campo elétrico entre as placas é mais forte, reforçando-se o acoplamento e tornando a capacidade do sensor maior.

No entanto, não surge qualquer capacidade adicional acoplada à *terra* como no caso do toque humano, o que constitui um ponto-chave na diferenciação dos casos. Como a capacidade C_{SENSOR} aumenta com a presença de água, segundo a Equação 7 a tensão lida na ADC será superior. Este aumento de tensão é precisamente contrário ao efeito que ocorre quando há um toque no transdutor por um dedo humano.

Tal como a água, o acoplamento entre as duas placas do transdutor tornar-se-á mais forte pela presença do dedo, contudo também ocorrerá um acoplamento à *terra* por parte de duas novas capacidades geradas (Figura 18).

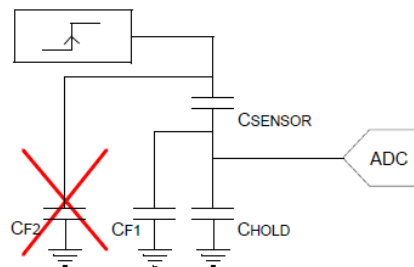


Figura 18 Efeito de um dedo no Transdutor Capacitivo

Embora a capacidade C_{CF2} não tenha qualquer impacto no valor lido pela ADC, o mesmo não se pode afirmar da capacidade C_{CF1} . Esta capacidade adicional, resultante da presença do dedo, implicará uma redução na tensão presente na entrada da ADC:

Equação 8 Tensão à entrada da ADC

$$V_{ADC} = \frac{V_{DD} \times C_{SENSOR}}{C_{SENSOR} + C_{HOLD} + C_{F1}}$$

Uma vez que a resposta à presença de água é a oposta ao toque de um dedo, torna-se fácil a prevenção de falsos toques.

Este método de fato previne a ocorrência de falsos toques mas apenas num único botão, ou seja, se existir água sobre todo o teclado e se tocar com o dedo numa tecla, todas as teclas irão “ver” um acoplamento à *terra*. Resumindo, esta técnica constitui apenas uma solução para casos de botões isolados não funcionando por exemplo no cada de um teclado capacitivo.

A *Cypress Semiconductor* desenvolveu uma solução para a construção de teclados capacitivos tolerantes à presença de água utilizando sensores adicionais de guarda (*guard sensor*) e elétrodos de blindagem (*shield electrode*) no circuito impresso, com o objetivo específico de detecção de água sobre o teclado e pela minimização do seu efeito [18]. Esta solução permite o correto funcionamento do teclado capacitivo na presença de água desde que a quantidade de líquido sobre o teclado não seja excessiva, por exemplo situações em que ocorra a submersão do teclado não são toleradas.

O elétrodo de blindagem funciona como um espelho da tensão presente aos terminais do transdutor capacitivo. Uma melhor explicação do seu funcionamento pode ser dada pela descrição do funcionamento do circuito representado na Figura 19 [18].

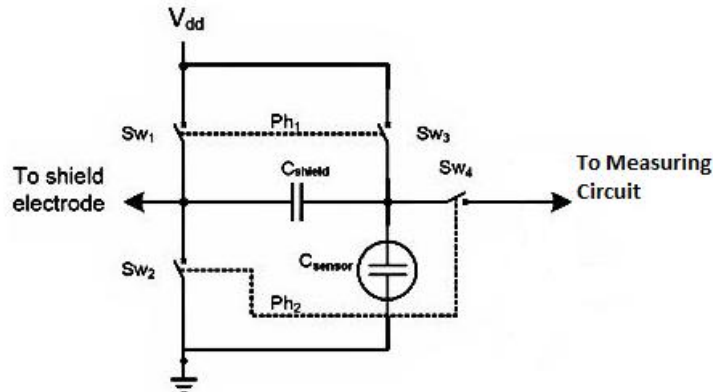


Figura 19 Representação do Circuito do elétrodo de blindagem

O funcionamento é dividido em duas fases. Na primeira fase, S_{W1} e S_{W3} estão fechados e S_{W2} e S_{W4} encontram-se abertos, a capacidade do transdutor (C_{sensor}) é carregada até V_{DD} e a capacidade associada ao elétrodo de blindagem (C_{shield}) tem os seus terminais curto-circuitados. Na segunda fase, os *switches* comutam e a capacidade do transdutor é descarregada para C_{shield} e para o circuito de leitura do transdutor.

A presença de água ou o toque no transdutor vão ambos aumentar o valor da sua capacidade. Contudo, tem efeitos opostos no eléctrodo de blindagem. Na presença de água, C_{shield} e C_{sensor} aumentam levando a um decréscimo da corrente que irá fluir para o circuito de leitura. Na presença do dedo como apenas C_{sensor} aumenta, a corrente que flui para o circuito de leitura será superior.

O sensor de guarda tem como função determinar a existência anormal de grandes quantidades de água sobre o teclado capacitivo (p. ex. quando submergimos o teclado). Este transdutor rodeia os transdutores capacitivos do teclado e produz um sinal de muito maior valor devido à presença de água do que à presença do toque. Se esse sinal atingir um valor limite, o teclado actua de acordo com o especificado pelo fabricante, pode como exemplo desligar-se de forma a evitar falsos toques que seriam gerados.

A utilização de um posicionamento específico do transdutor para evitar depósitos de água sobre este (por exemplo: inclinação do transdutor) também pode constituir uma solução.

2.4.3. Influência de Campos Eletromagnéticos

A capacidade sensorial de sensores capacitivos é um processo de medição analógico capaz de detetar variações na capacidade na ordem do *pico* ou mesmo *femto* Farads, sustentado por um vasto processamento de sinal. Se fosse possível reduzir a uma distância idealmente nula a separação entre o transdutor capacitivo e o circuito integrado que processa o sinal, problemas com o ruído não se colocavam. Contudo, esse não é o caso e há ligações na ordem dos centímetros entre o transdutor e o circuito integrado que funcionam como entrada para o ruído no sistema. O ruído pode causar corrupção dos dados ou anomalias temporais, levando a deteções falsas [19].

2.4.3.1. Ruído Radiado

Os sensores capacitivos podem ser vistos como entradas de alta impedância que, quando colocados junto a sistemas que radiem um campo eletromagnético forte, funcionam como antenas. Nas suas mais diversas aplicações, é muito provável que os sensores capacitivos tenham de trabalhar perto de emissores de radio frequência (telemóveis, Wi-Fi, Bluetooth, linhas de transmissão,...) e assegurar a imunidade dos sensores a essas interferências é um desafio.

São abaixo apresentadas algumas técnicas que ajudam a garantir imunidade dos sensores capacitivos face ao ruído radiado para que estes possam cumprir os requisitos dos *standards* internacionais na área (IEC 61000-4-3) [20].

2.4.3.1.1. Condensadores de Desacoplamento

Os circuitos digitais necessitam de fontes de alimentação estáveis para funcionarem corretamente. O desacoplamento nos circuitos integrados, usando condensadores para desacoplamento, constitui uma das soluções para se criar sistemas robustos a fontes de alimentação instáveis. No entanto, tem de se ter em consideração que um condensador real tem elementos parasitas e que a sua impedância equivalente está dependente da frequência, realizando o desacoplamento pretendido apenas para uma banda de frequências. Como um condensador real tem uma indutância parasita em série, há uma frequência de ressonância para a qual a impedância volta a aumentar (Figura 20).

É necessário usar um conjunto de capacidades para se efetuar o desacoplamento na gama de frequências pretendida, garantindo uma estabilização das tensões de alimentação. As capacidades para desacoplamento devem estar colocadas o mais junto possível do circuito integrado, devendo ser a capacidade de menor valor a mais próxima do circuito integrado [20].

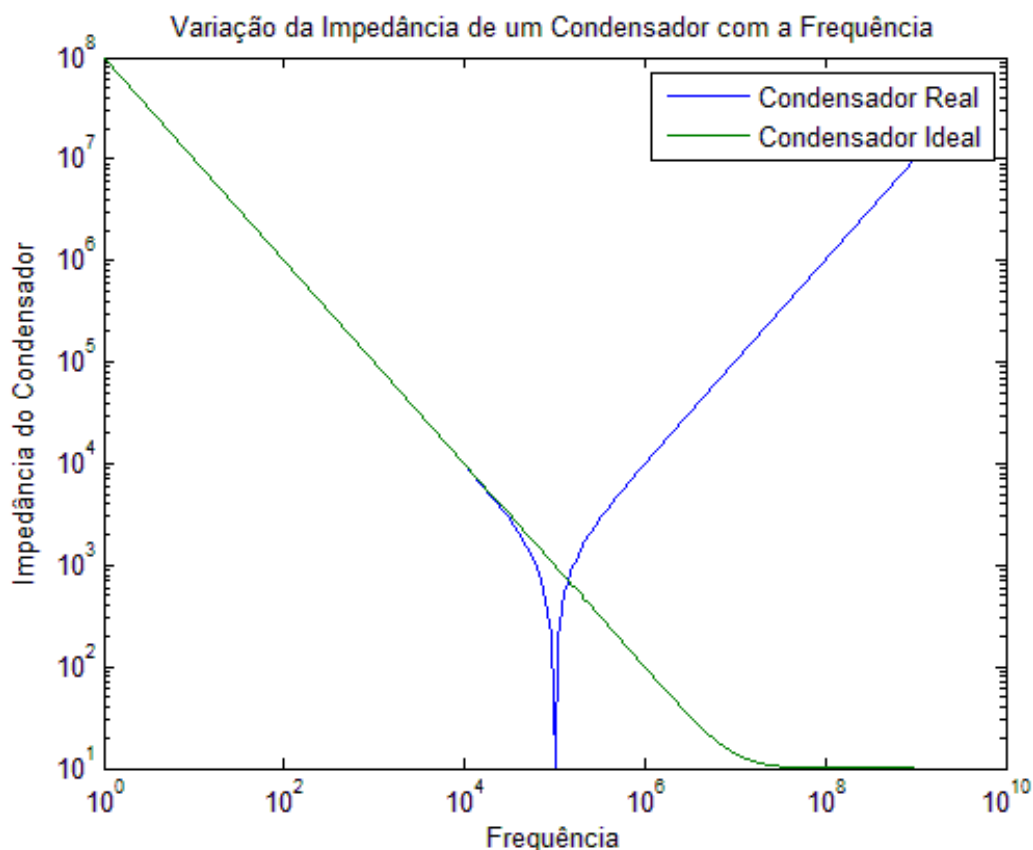


Figura 20 Variação da Impedância de um Condensador com a Frequência

2.4.3.1.2. Filtros RC e LC

À medida que avançamos na frequência, para se concretizar um bom desacoplamento é necessário o uso de capacidades cada vez menores. Isto é, para frequências cada vez mais elevadas são precisos valores de capacidades cada vez menores para que a impedância equivalente permaneça igual. Em geral, condensadores com bom comportamento a altas frequências têm capacidades pequenas (o seu comportamento está dependente do valor da indutância parasita). É necessário o uso de um elevado número de condensadores para efetuar um bom desacoplamento e se adquirir a imunidade às emissões de rádio frequência. Esta necessidade é desvantajosa pois implica por exemplo acréscimos de custos com componentes e há um aumento das dimensões físicas do circuito, pois quantos mais componentes, maior será o espaço ocupado.

Um método alternativo passa por se utilizarem filtros passa-baixo RC e LC nas linhas de alimentação e comunicação para se atenuar ruídos. Neste método, a escolha da frequência de corte, pela seleção dos componentes do filtro, tem de ter especial atenção à frequência de transmissão de dados para que esta se encontre na banda de passagem e não seja atenuada juntamente com o ruído [20].

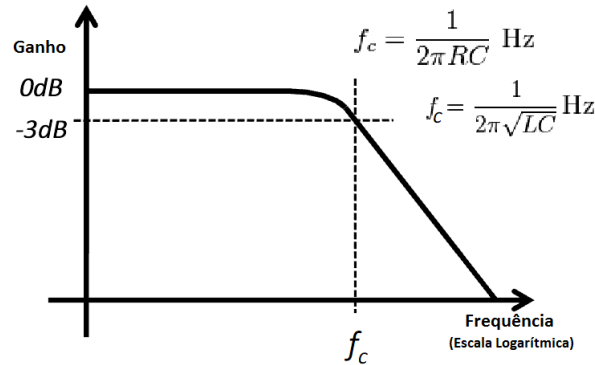


Figura 21 Resposta em Frequência de um filtro passa-baixo

2.4.3.1.3. Componentes Não Usados ou Ligações em Aberto

Por vezes, na construção de uma aplicação com sensores capacitivos são colocados no esquemático componentes que não são utilizados na aplicação inicial, mas que têm o objetivo de dotar a aplicação com outras funcionalidades que poderão vir a ser utilizadas futuramente. Olhando para a aplicação real, as ligações para esses componentes serão deixadas em aberto formando antenas para a entrada de ruído.

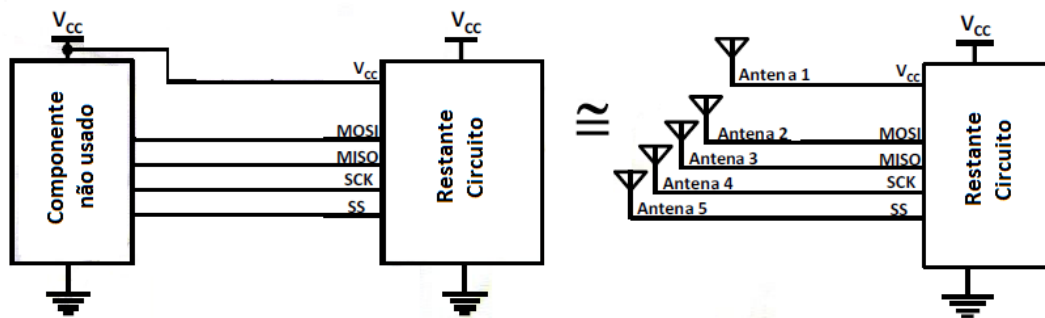


Figura 22 Componente não usado numa aplicação com sensores capacitivos

Uma solução para esse problema passa pelo uso de resistência de 0Ω em série para desacoplamento das ligações em aberto Figura 23 [20].

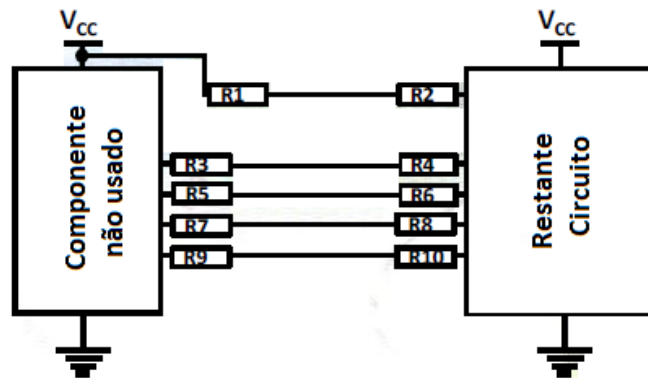


Figura 23 Uso de Resistências de 0Ω para prevenir a criação de antenas RF

Essas resistências devem ser colocadas ou no terminal da ligação que se encontra mais longe do componente não utilizado ou em ambas as extremidades da ligação [20].

2.4.3.1.4. Acoplamento à Terra

As correntes de rádio frequência introduzidas no circuito integrado procuram fluir, como qualquer outro tipo de corrente elétrica, por malhas com menores impedâncias. Uma vez que as correntes de rádio frequência são correntes de altas frequências e como uma indutância tem uma impedância equivalente proporcional à frequência (Equação 9) enquanto que um condensador tem uma impedância inversamente proporcional (Equação 10), estas correntes vão procurar evitar malhas com indutâncias, preferindo as malhas com capacidades.

Equação 9 Impedância equivalente à Indutância

$$Z_{Indutância} = j\omega L$$

Equação 10 Impedância equivalente à Capacidade

$$Z_{Capacidade} = \frac{1}{j\omega C}$$

No entanto, num circuito é difícil prever exatamente por onde as correntes de rádio frequência irão ou não fluir. É necessário garantir-se que se fornece um caminho com a menor impedância possível com a ligação à terra.

Resumindo, o uso de condensadores de desacoplamento ou de filtros passa-baixo deixa de ter a utilidade pretendida se nessa malha existir uma alta indutância parasita. Veja-se o exemplo da Figura 24 retirado de um documento da empresa *Azoteq*: “apesar de o condensador de desacoplamento C se encontrar corretamente posicionado junto ao *ProxSense IC*, a ligação deste à terra é longa e estreita criando-se uma indutância parasita elevada. Por outro lado, a ligação à terra do chip *ProxSense IC* é pequena e, portanto, de baixa indutância” [20].

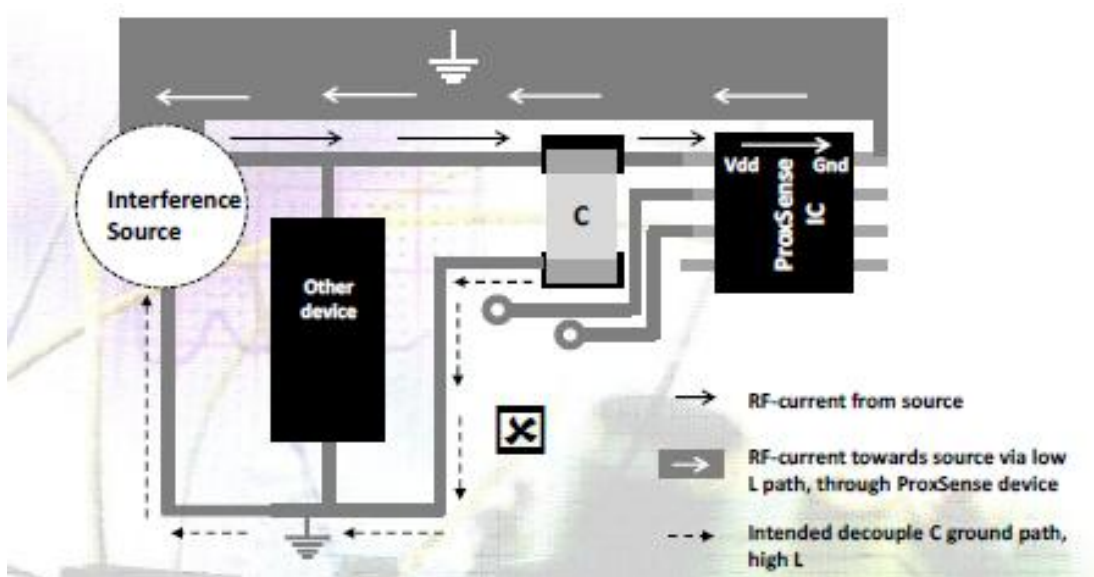


Figura 24 Demonstração da importância da indutância nas malhas de desacoplamento

Nesse caso, as correntes rádio frequência irão procurar malhas alternativas com menor impedância (as correntes rádio frequência vão fluir através do *chip*), levando a que aplicação falhe sob testes de imunidade ao ruído de rádio frequência. É muito importante garantir que malhas de desacoplamento ou filtragem tenham a menor indutância parasita possível. É aconselhável, sempre que possível, preencher o PCB, tanto na camada superior como na inferior, com planos de *terra* sólidos, conectados um ao outro por “vias’s” de forma a encurtar ligações à *terra* (não se devem colocar estes planos de *terra* junto nem debaixo dos sensores capacitivos nem das ligações destes ao microcontrolador pois diminuem a sensibilidade) [20].

2.4.3.1.5. Enrolamentos

Nas radiações de rádio frequência é propagada energia sob a forma de campo elétrico e campo magnético. Se houver ligações no circuito que formem enrolamentos de corrente, devido à presença de um campo magnético surgem correntes induzidas no sistema (Figura 25). Como as ligações entre os diversos componentes do sistema não são ideais, isto é, não possuem uma resistência nula, há variação na tensão elétrica ao longo de uma ligação.

Olhando para o caso apresentado na Figura 25, a ligação à *massa* dos três componentes do circuito forma um enrolamento. Como resultado da presença de um campo magnético surgem correntes induzidas que fluem por esta ligação. Uma vez que a ligação não tem uma resistência nula, há uma queda de tensão e, como consequência, os pontos a, b e c apresentam diferenças no seu valor de tensão. Esta situação pode levar ao aparecimento de erros, principalmente quando nos referimos a tensões de referência, isto é, os diversos componentes ficam com tensões de referência diferentes quando deviam ser iguais.

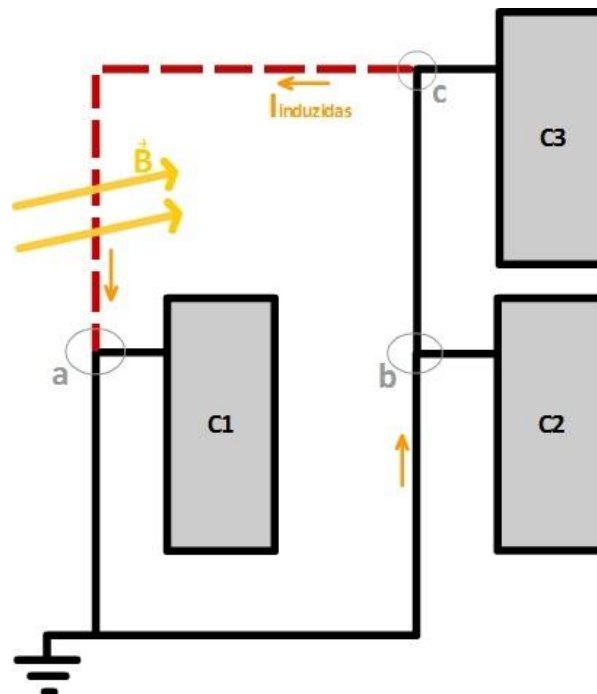


Figura 25 Influência do Campo Magnético em enrolamentos de correntes

Assim, estes enrolamentos de correntes devem ser evitados sempre que possível, o que dito por outras palavras significa que as ligações dos vários elementos à *massa* têm que ter uma

estrutura em árvore. Pegando no caso concreto da Figura 25, a ligação representada a tracejado deve ser removida.

2.4.3.2. Ruído Conduzido

O ruído conduzido resulta de interferências de rádio frequência, com uma gama de frequências compreendida normalmente entre os 150Khz e os 80Mhz, que são introduzidas nos cabos que interligam as diferentes partes do sistema (por exemplo os cabos de alimentação). Como estas ligações conduzem ruídos sob a forma de correntes e tensões de rádio frequência que interagem e alteraram o comportamento dos componentes eletrónicos torna-se importante garantir que aplicações suscetíveis a este tipo de ruídos se tornem imunes.

O ruído conduzido pode ser gerado por transmissores RF, por fontes de alimentação comutadas ou até por outros dispositivos eletrónicos que funcionem numa gama de frequências na zona da rádio frequência. Este tipo de ruído é normalmente gerado em modo comum e aparece em todas as ligações que conectam o sistema, não sendo crítico para uma aplicação que usa sensores capacitivos enquanto não ocorre uma interação humana. Sem a interação humana, a aplicação funciona corretamente porque, apesar do ruído RF, a fonte de alimentação é capaz de manter estável a diferença de tensão entre V_{DD} e GND, já que não existe nenhuma malha de retorno para a referência do ruído (normalmente a Terra).

Contudo, quando ocorre uma interação humana o nosso corpo fornece um caminho para a Terra, essencial para a deteção do toque na maioria dos métodos de leitura de sensores capacitivos, e o ruído é acoplado para o sensor capacitivo. Dependendo da quantidade de ruído existente poderão ocorrer situações de erro ou num caso extremo a aplicação pode ficar completamente inutilizável [21]. Pode haver situações em que o corpo humano se encontre eletricamente isolado e esse caminho não seja fornecido, evitando-se problemas com o ruído conduzido. No entanto, este fenómeno pode implicar a incapacidade de deteção do toque por tecnologias que precisem dessa ligação para funcionarem. Esta situação foi testada na *Exatronix* com a tecnologia *QTouch* da *Atmel*, ou seja, este método de leitura de sensores capacitivos não é capaz de detetar o toque se uma pessoa se encontrar dentro de uma banheira e, portanto, eletricamente isolada.

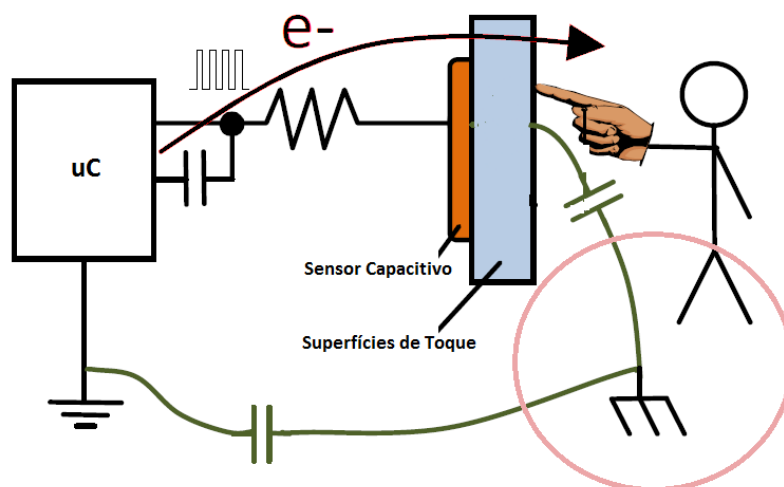


Figura 26 Necessidade do caminho de retorno para a terra através do corpo humano

A Figura 26 representa o funcionamento da tecnologia *QTouch* da *Atmel*. Como se pode observar, é necessário que o corpo humano forneça um caminho de retorno para a *terra* para se fechar o circuito e haver transferência de carga. No entanto, se o corpo estiver eletricamente isolado, o caminho através do corpo humano será visto como uma ligação em aberto e como consequência não haverá detecção do toque, pois não haverá transferência de carga.

Como o ruído conduzido é um ruído de altas frequências as técnicas apresentadas no capítulo 2.4.3.1 constituem soluções para tornar o sistema imune segundo o *standard* IEC/EN 61000-4-6 [19].

É de seguida apresentada uma técnica adicional de melhorar a resposta do sistema a este tipo de ruído.

2.4.3.2.1. Bloqueio do Ruído Conduzido

Normalmente, o ruído conduzido que se propaga em modo comum chega ao sistema através dos cabos de alimentação. Uma boa técnica para bloquear a entrada desse ruído no sistema passa por aumentar da impedância desses cabos, minimizando as correntes de rádio frequência que aí se propagam. É necessário que esta impedância introduzida seja dependente da frequência para que as tensões e correntes de alimentação DC ou AC não sejam atenuadas. Para se aumentar a impedância nestas ligações sem influenciar as baixas frequência é comum fazer enrolamentos com essas ligações sobre núcleos magnéticos (denominado em inglês por *Common mode chokes*) [22].

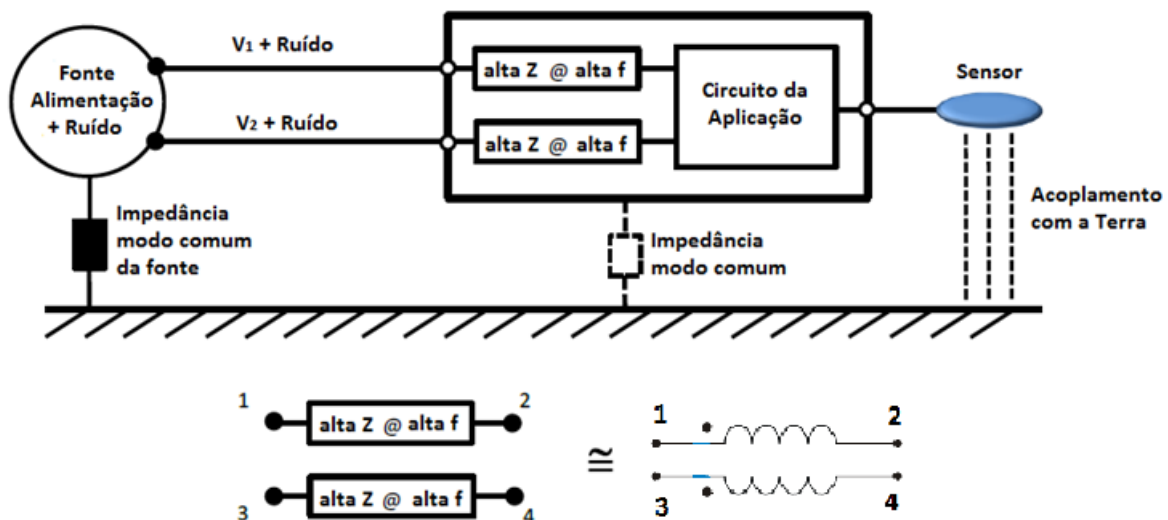


Figura 27 Bloqueio de ruído RF conduzido por aumento da impedância das linhas de alimentação

A impedância deste tipo de enrolamentos é bastante dependente da frequência, atingindo um ponto máximo, a partir do qual começa a dominar a capacidade parasita que se encontra em paralelo com a indutância, diminuindo novamente a impedância como se observa na Figura 28.

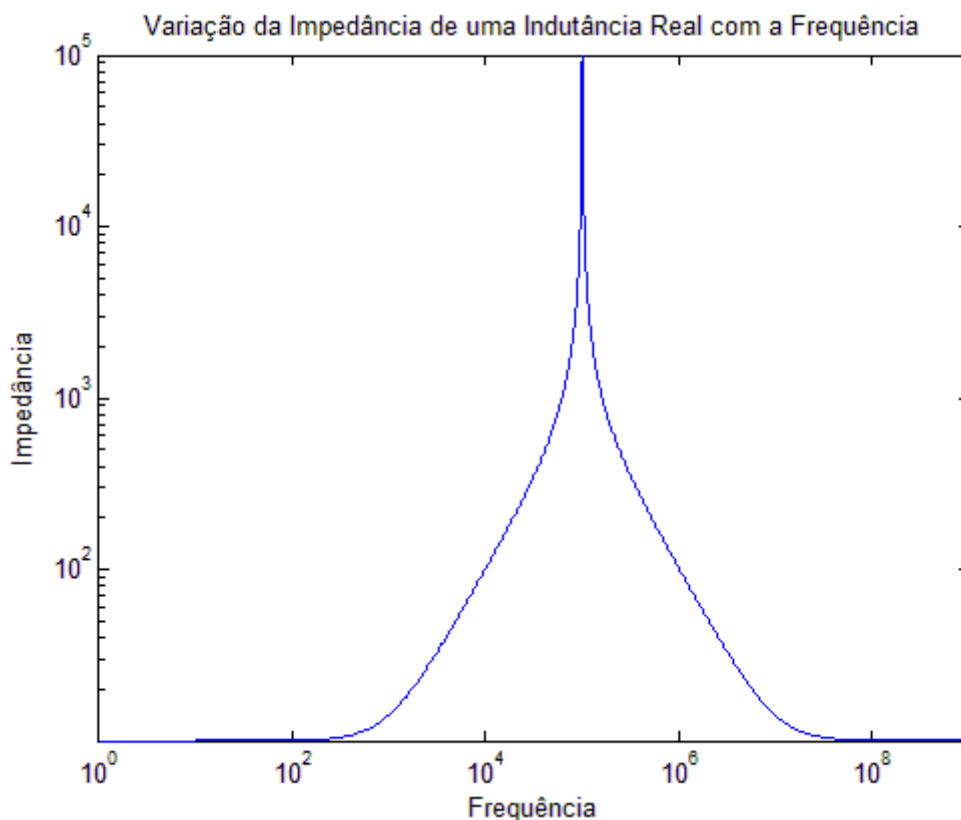


Figura 28 Variação da Impedância de uma Indutância Real com a Frequência

Assim sendo, deve-se prestar atenção ao número de enrolamentos e principalmente ao seu sentido para que o bloqueio seja efetivamente realizado no intervalo de frequências pretendido. O sentido de enrolamento deve fazer com que o ruído que se propaga em modo comum em ambas as linhas se anule mutuamente. Caso contrário, esta técnica piora ainda mais a situação.

2.4.3.3. Descargas Electroestáticas

Os circuitos integrados estão inevitavelmente sujeitos a descargas electrostáticas que podem danificar o sistema. Estas descargas podem surgir durante o processo de produção da aplicação, podem ser geradas pelo próprio circuito integrado ou mais comumente pelo corpo humano. É importante utilizar técnicas que tornem o sistema robusto, minimizando os “estragos” feitos por estas descargas e que o torne capaz de passar nos testes exigidos pelo *standard* IEC61000-4-2 [23].

2.4.3.3.1. Resistências Série

A forma mais comum de proteger o circuito integrado contra as descargas eletrostáticas passa pelo uso de resistências entre o microcontrolador e o transdutor do sensor. O uso da resistência tem como funcionalidade limitar os picos de corrente e ajudar a dissipar o excesso de potência gerado por esse pico. O aumento da impedância entre o transdutor e o microcontrolador deve procurar maximizar a proteção contra descargas electrostáticas sem influenciar o normal funcionamento do sistema [23].

O uso destas resistências é ainda útil para tornar o sistema imune ao ruído radiado e conduzido pois aumenta a impedância da ligação transdutor-microcontrolador fazendo com o ruído flua por malhas de menor impedância e desenhadas para o propósito.

2.4.3.3.2. Superfícies de Toque

As superfícies de toque são superfícies não condutoras que separam o transdutor capacitivo do toque humano. Devido às suas propriedades não condutoras, as superfícies fornecem uma forma de proteção do sistema contra as descargas eletrostáticas provenientes do corpo humano.

2.4.3.3.3. Díodos TVS

Os díodos “transient voltage suppression” são utilizados como uma forma de proteção contra ESD apenas em casos em que o transdutor capacitivo se encontra diretamente exposto ao toque ou se a superfície de toque possui defeitos. Tem de se ter em conta que o uso de díodos TVS tem influência na sensibilidade do sensor, diminuindo-a uma vez que este diodo acrescenta mais uma capacidade parasita. A influência na sensibilidade pode variar entre diferentes modelos da aplicação [23].

2.4.3.3.4. Transístores BJT

É possível usar um transístor BJT como se encontra representado na Figura 29 com o objetivo de dissipar os picos de corrente gerados pelas descargas electrostáticas. O modo de operação é descrito pelo efeito “avalanche breakdown” da junção pn base-coletor (BC) do transístor NPN, isto é, a junção BC entra temporariamente num estado de “breakdown” quando a tensão V_{BC} aumenta até uma tensão superior a V_{CBO} , o que normalmente acontece quando ocorrem descargas electrostáticas.

Quando a junção base-coletor do transístor entra num modo de “avalanche breakdown”, o transístor conduz e dissipa a corrente gerada pela descarga electrostática.

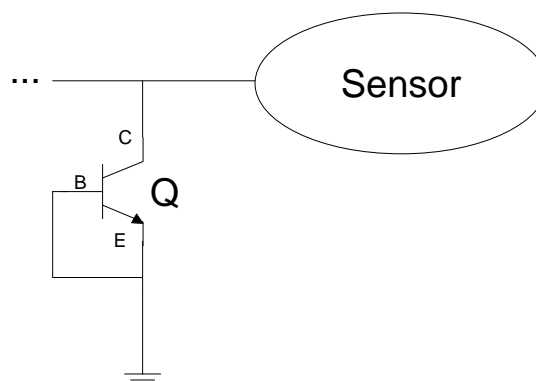


Figura 29 Uso de um transístor BJT para proteção contra descargas eletroestáticas

Contudo, as capacidades parasitas base-coletor e base-emissor podem influenciar a desempenho do sistema podendo-se traduzir numa ligeira diminuição da sensibilidade do sensor [23].

2.4.4. Desempenho do Sistema versus Consumo de Energia

Com os avanços na tecnologia, cada vez mais equipamentos eletrônicos são alimentados por baterias, tornando o consumo energético um fator fundamental para as aplicações. Assim sendo, quando se projeta um sistema para uma determinada aplicação é importante realizar uma escolha cuidadosa dos seus componentes, atendendo ao seu consumo energético para que o sistema funcione com o menor consumo possível.

A poupança no consumo energético não se restringe apenas à escolha do controlador que consome menos energia. É importante que o dimensionamento dos restantes componentes, por exemplo as resistências, seja feito de modo a que as correntes que fluem pelo sistema sejam as mínimas necessárias.

As aplicações que usam sensores capacitivos necessitam de microcontroladores ou de outro *chip* que consiga realizar o processamento do sinal proveniente dos transdutores. O consumo instantâneo deste controlador está dependente do número de recursos ativos num determinado instante. Desligar os recursos desnecessários ao normal funcionamento do sistema ajuda a reduzir o consumo energético. Outros fatores como a tensão de alimentação requerida pelo sistema ou a velocidade de relógio do CPU também influenciam o tempo de vida de uma bateria.

Se o controlador o permitir, a entrada no modo de inatividade (em inglês *sleep mode*) quando há longos períodos de inatividade é uma forma de aumentar o tempo de vida de uma bateria pois a corrente consumida neste modo inativo é sempre inferior comparativamente à consumida no modo ativo.

Equação 11 Corrente Média Consumida

$$I_{média} = \frac{I_{modo\ ativo} \times T_{modo\ ativo} + I_{modo\ inativo} \times T_{modo\ inativo}}{T_{modo\ ativo} + T_{modo\ inativo}}$$

Se a corrente em modo inativo é inferior à corrente em modo ativo, é útil minimizar o $T_{modo\ ativo}$ e maximizar o $T_{modo\ inativo}$ para minimizar a corrente média consumida pelo sistema. Contudo, a redução do consumo de energia tem como custo o aumento do tempo de resposta do sistema (tempo que o sistema demora a fornecer uma saída válida quando tem na entrada informação válida).

Depois de o controlador entrar no modo inativo, este é normalmente acordado por uma interrupção, por exemplo, gerada periodicamente por um *Timer* para verificar a situação dos sensores. Se não houver alterações nos sensores, o controlador volta ao modo inativo. Caso contrário, no modo ativo realiza o processamento necessário, regressando ao modo inativo apenas quando ocorrer um novo longo período de inatividade.

Na Figura 30 observa-se os resultados de um teste realizado por dois engenheiros da empresa *Cypress Semiconductors* a um controlador, produzido nessa instituição, para aplicações que usam sensores capacitivos. Do teste conclui-se que o tempo de resposta do sistema está dependente do consumo energético do mesmo. Do gráfico conclui-se que quando se pretender melhorar o consumo do sistema há, como consequência, uma degradação do tempo de resposta do sistema. O sistema terá de ser projetado segundo um compromisso para que possa cumprir da melhor forma os requisitos da aplicação. Este teste encontra-se documentado em [24].

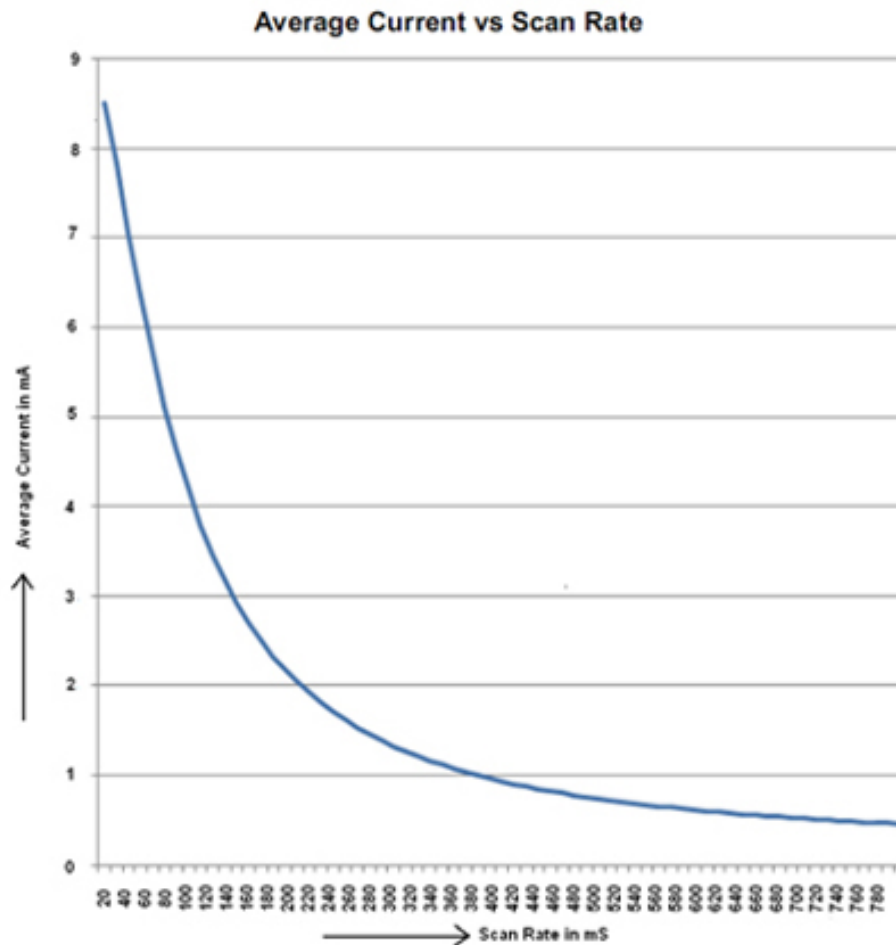


Figura 30 Corrente Média Consumida versus Número de Ativações do Microcontrolador por mS

Há ainda algumas técnicas que se podem implementar para reduzir o consumo no modo ativo ou reduzir o intervalo de tempo que o controlador necessita de permanecer neste estado. A redução da frequência de relógio do CPU quando este não tem dados para processar e espera pela informação proveniente do sensor, retomando a frequência normal de operação apenas em rotinas de serviço para atendimento a interrupções, ou maximizando a eficiência do controlador, isto é, enquanto espera pelos dados de um sensor realiza o processamento de sinal dos sensores já lidos ajudam a maximizar a eficiência da utilização da bateria [24].

O uso de sensores de proximidade é também uma boa técnica para baixar o consumo de energia do sistema, isto é, o controlador após um longo período de inativado é colocado em modo inativo, realizando durante este modo leituras periódicas ao sensor de proximidade. Quando é detetado a aproximação de uma mão, o controlador passará ao estado ativo [25].

Resumindo, se um sistema de deteção do toque (através de sensores capacitivos) for alimentado por uma bateria é importante diminuir os consumos energéticos de forma a maximizar o tempo de vida útil da bateria. Contudo, deve-se prestar atenção ao tempo de resposta do sistema. Um aumento excessivo do tempo de resposta poderá resultar na não deteção de toques curtos por parte do sistema ou poderá resultar numa utilização desconfortável para o utilizador. Por outras palavras, o sistema poderá demorar demasiado tempo a responder ao toque ou ao movimento do

toque do utilizador. Deve-se assim procurar uma solução de compromisso entre o consumo energético e o tempo de resposta do sistema.

2.5. Robustez no Processo de Leitura: Soluções de *Software*

A presença de ruídos no meio ambiente, diferenças de temperatura ou picos de tensão na alimentação do sistema podem levar a situações de erro na leitura dos sensores capacitivos. Por outras palavras, os distúrbios referidos podem levar a que, momentaneamente, o sinal que resulta da capacidade do sensor possa atingir um valor tal que seja detetado um toque sem que este efetivamente ocorra. Este problema de falso toque pode ser resolvido por *software*, existindo várias abordagens para o contornar.

2.5.1. Solução 1

A solução mais simples implica que um determinado número de amostras consecutivas lidas a partir do sensor indiquem que o botão foi pressionado (ou não) para que se transite de nível (de não pressionado para pressionado, ou vice-versa). O número de leituras consecutivas necessárias para a transição de nível é definido pelo programador com base nos requisitos da aplicação. Quanto maior este for, menor será a probabilidade de erro. Contudo, levará a que o tempo de resposta do sistema seja maior [11].

2.5.2. Solução 2: Média de Amostras com Decimação

O sensor é lido múltiplas vezes (o número de vezes é definido pelo programador) e posteriormente, procede-se ao cálculo da média dos valores lidos. Usa-se esse valor médio calculado para determinar se o botão se encontra numa situação de pressionado ou não. Depois de se determinar o nível da saída do sensor, elimina-se as amostras anteriormente usadas e lê-se um novo conjunto de amostras para o novo cálculo da média. Este ciclo repete-se durante todo o tempo de funcionamento do sensor. O facto de existir um pequeno número de leituras incorretas devido a ruídos terá um efeito mínimo no valor médio final calculado, por outras palavras, quanto maior for o número de amostra no cálculo da média, menor será o efeito das leituras erradas mas, levará ao aumento do tempo de resposta do sistema [11].

2.5.3. Solução 3: Filtro FIR

Nesta solução não é necessária a leitura de um novo conjunto de amostras para a determinação do nível da saída do sensor, mas apenas de uma nova amostra. É mantido em memória um *array* com os valores das últimas L amostras retiradas. Quando um novo valor é lido, este é introduzido no *array* e o mais antigo removido. O valor médio do *array* é usado pelo *software* para se determinar o nível atual do botão. Quanto maior o *array*, menor será o impacto de leituras incorretas na definição do nível [11]. Este processo é equivalente a um filtro FIR (*Finite-Impulse Response*) definido matematicamente pela Equação 12.

Equação 12 Modelo Matemático de um Filtro FIR

$$Y[n] = \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} X[n - k]$$

Onde:

$Y[n]$ representa a média do conjunto de amostras – saída do filtro,

$X[n]$ representa as amostras lidas – entrada do filtro,

L representa o número total de amostras consideradas – memória do filtro.

2.5.4. Solução 4: Filtro IIR

Um filtro IIR é definido matematicamente pela Equação 13.

Equação 13 Modelo Matemático de um Filtro IIR

$$Y[n] = Y[n - 1] + \frac{X[n] - Y[n - 1]}{L}$$

Onde:

$Y[n]$ representa a saída do filtro,

$X[n]$ representa a entrada do filtro,

L representa a memória do filtro.

Para explicar o funcionamento deste filtro, preste-se atenção ao seguinte exemplo: existe uma variável que contém o valor médio resultante das últimas amostras lidas do sensor (para efeitos explicativos, considera-se que esse valor médio resulta das últimas 10 amostras lidas). Quando é retirada uma nova amostra, a atualização do valor médio processa-se da seguinte maneira: adiciona-se o valor da nova amostra ao valor médio em memória multiplicado por 9 ($L-1$). O resultado dessa soma é dividido por 10 (L) e é obtido o novo valor a ser levado em consideração na determinação do estado do sistema [4]. Este processo é o funcionamento de um filtro IIR (*Infinite-Impulse Response*) cujo diagrama é representado na Figura 31 e definido matematicamente pela Equação 13.

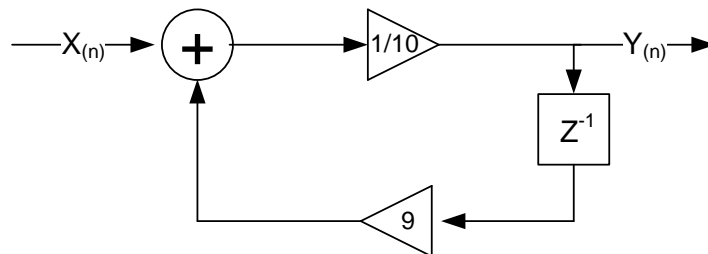


Figura 31 Exemplo de um Filtro IIR

2.5.5. Solução 5: Filtro Passa-Baixo *Butterworth*

Um filtro passa-baixo *Butterworth* encontra-se definido matematicamente na Equação 14.

Equação 14 Modelo Matemático de um Filtro Digital Passa-Baixo *Butterworth*

$$Y[n] = X[n] + X[n - 1] + A \times Y[n - 1]$$

Um filtro *Butterworth* é um filtro IIR que normalmente exige uma menor capacidade de processamento comparativamente ao exposto em 2.5.4, isto é, um filtro passa-baixo *Butterworth* não precisa de realizar divisões. A operação mais complexa é a multiplicação entre o coeficiente do filtro ($0 \leq A < 1$) e a saída anterior do filtro. Se o coeficiente for escolhido cuidadosamente, é possível realizar essa multiplicação recorrendo apenas a deslocamentos de bits. Quanto mais próximo se encontrar o coeficiente de 1, menor será a frequência de corte do filtro, aumentando a eficiência do filtro. Contudo, o tempo de estabilização do filtro também será maior [10].

O tempo de execução de um filtro IIR exposto em 2.5.4 e do filtro *Butterworth* será reduzido se os fatores multiplicativos forem potências de 2, pois nessa situação a operação é efetuada utilizando apenas uma deslocamento de bits.

2.6. Uso de 3 Placas Metálicas na Construção de Transdutores Capacitivos

Os métodos de construção de sensores de toque capacitivo descritos em 2.1 têm associado a si as diversas vantagens já referidas. Contudo, também possuem variadas limitações nomeadamente a sensibilidade a ruídos radiados e conduzidos, dificuldades de leitura correta do sensor quando há presença de água ou outros contaminantes sobre este ou impossibilidade de leitura de um toque realizado indiretamente por um dedo (uso de luvas) ...

Para se contornar essas limitações pode-se usar uma terceira placa condutora, suspensa sobre o transdutor de toque capacitivo. A deteção do toque deixa de ser efetuada devido às propriedades elétricas do corpo humano mas devido à deformação efetuada pelo toque na terceira placa.

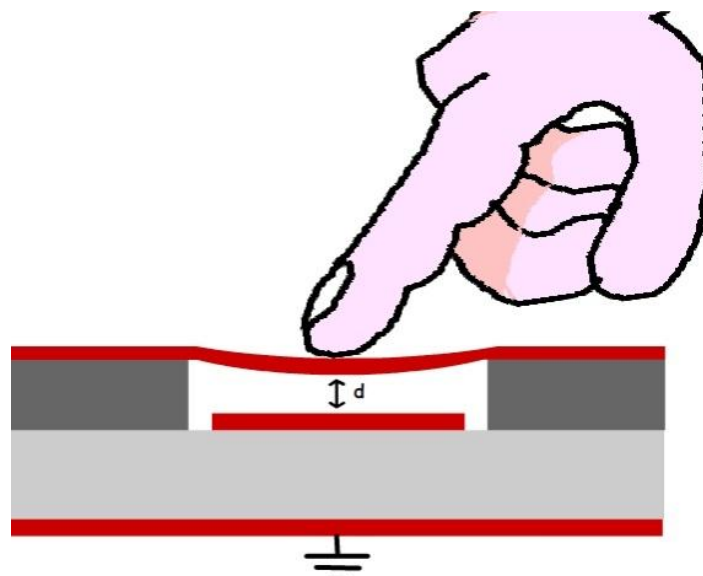


Figura 32 Sensor Capacitivo baseado em 3 placas condutoras

Como se pode mostrar pela Figura 32, a deformação imposta pelo dedo irá resultar numa redução do espaço entre a terceira placa e o transdutor, alterando o valor total da capacidade deste.

Nesta solução, há vários novos aspetos de construção a ter em conta como a espessura da placa metálica adicional e a distância desta ao transdutor. Se usarmos uma placa de grande espessura, a deflexão imposta pelo dedo humano será mínima, não permitindo a deteção do toque. Se for exageradamente fina, qualquer “distúrbio” sobre a placa poderá levar à sua deformação e à consequente deteção de toque, para além da grande fragilidade do transdutor (há o risco de destruição da placa devido a toques demasiado violentos). Relativamente à distância, se o espaçamento entre a placa e o transdutor for bastante significativo, a deformação poderá não ser suficiente para que se atinja o limiar de deteção de toque, se for muito pequena a força do toque pode ser tal que a placa entre em contacto direto com o transdutor inviabilizando a leitura deste, porque se há contacto entre as placas, não há condensador.

Tomando em consideração parâmetros como o tamanho e o espaçamento dos transdutores, estes têm de possuir um tamanho suficiente para que seja possível uma deformação razoável da placa metálica adicional e os diversos transdutores têm de estar suficientemente afastados para que a força aplicada num deles não seja detetada nos transdutores adjacentes.

O facto de ser possível ligar a terceira placa à *terra* vai fazer com que o transdutor fique “protegido” de ambos os lados contra perturbações exteriores como ruídos. A questão de falsos toques devido a presença de água sobre o transdutor deixa-se de colocar. Devidamente ajustado o limiar de deteção, a água não conseguirá exercer pressão suficiente para que seja detetado como um toque. Como a deteção do toque resulta de um movimento mecânico da placa condutora, toques feitos através de luvas passam a ser detetados. Contudo, esta solução exige a utilização de recursos adicionais. Isso resulta num aumento de custos de construção e a ocupação de um maior espaço no sistema. Para além disso, este método envolve o movimento mecânico da placa o que levará inevitavelmente à degradação do transdutor com o tempo e o uso [26].

2.7. Régua Capacitiva

Uma régua capacitiva funciona como um sensor de toque que é capaz de determinar a posição de um dedo ao longo de uma faixa capacitiva. São, de seguida, apresentadas as duas abordagens de construção usadas por alguns dos maiores construtores destas aplicações.

2.7.1. Régua Capacitiva Analógica

O *hardware* de um sistema deste género desenvolvido pela *Microchip* consiste no uso de dois canais de transdutores capacitivos, moldados em forma de triângulo e separados por uma linha de *terra* [11].

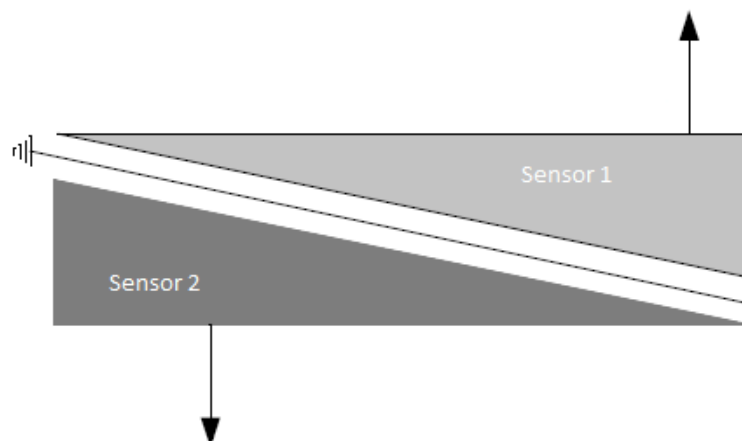


Figura 33 Régua Capacitiva Analógica

A régua capacitiva tem como princípio a leitura do deslocamento da capacidade relativamente ao seu valor nominal quando não é tocada por um dedo. Quando o sistema é ligado, as primeiras leituras realizadas aos sensores têm como objetivo a determinação do valor nominal base de cada capacidade. Posteriormente, quando o valor lido em ambos os canais de sensores ultrapassar um limiar, é declarado a detecção de um toque e procede-se ao cálculo da respetiva posição deste. Na ocorrência de um toque, são lidos os valores de ambos os sensores e calculada a diferença entre o valor da capacidade lida e o valor da capacidade base armazenada em memória. Uma vez que cada transdutor possui uma forma triangular, é de esperar que a diferença calculada seja mínima numa situação em que a zona de contacto do transdutor com o dedo seja menor (zona mais estreita) e maior numa zona de contacto do transdutor com o dedo seja maior (zona mais larga). Calculada a diferença no valor das capacidades cada sensor, procede-se à determinação da posição do dedo em cada sensor através da Equação 15.

Equação 15 Cálculo da Posição do Dedo num Sensor Capacitivo

$$Posição\ Dedo\ Sensor\ 1 = \frac{Dif.\ Capacidade\ Sensor\ 1 \times Fator\ Escala^4}{Dif.\ Capacidade\ Sensor\ 1 + Dif.\ Capacidade\ Sensor\ 2}$$

O valor final da posição do dedo resulta de uma média dos dois valores de posição determinados, um para cada sensor.

Equação 16 Calculo da Posição Final

$$Posição = \frac{Posição\ Dedo\ Sensor\ 1 + Posição\ Dedo\ Sensor\ 2}{2}$$

⁴ Por fator escala entende-se a divisão em partes do sensor (por exemplo: de 0 a 100)

Por uma questão de linearidade e precisão da régua capacitiva, é importante manter as placas de cada sensor o mais próximo possível uma vez que a detecção e o cálculo da posição do toque são obtidos por comparação dos valores das capacidades dos transdutores triangulares [11].

2.7.2. Régua Capacitiva Digital

A abordagem utilizada por fabricantes como a *Texas Instruments* usa um conjunto de sensores capacitivos simples de funcionalidade *on/off* na construção de réguas capacitivas [27] [14]. Uma vez que este conjunto de transdutores é colocado em linha reta e próximos uns dos outros, é possível implementar a funcionalidade de detecção da posição do dedo ao longo da faixa capacitiva.

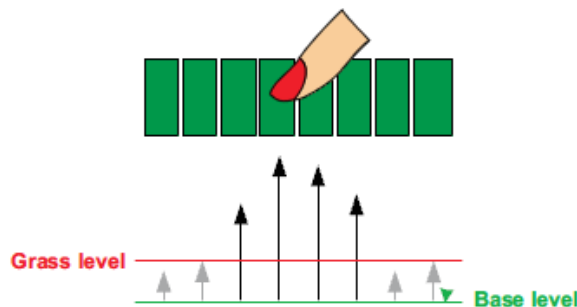


Figura 34 Detecção de um dedo numa Régua Capacitiva

Através do uso de diferentes limites de detecção (a capacidade resultante no transdutor devido ao toque humano no seu centro é superior comparativamente à situação em que o transdutor é tocado na periferia, ou seja, a capacidade é diretamente proporcional à área de contacto, Equação 4) é possível criar a detecção de múltiplas posições num único sensor.

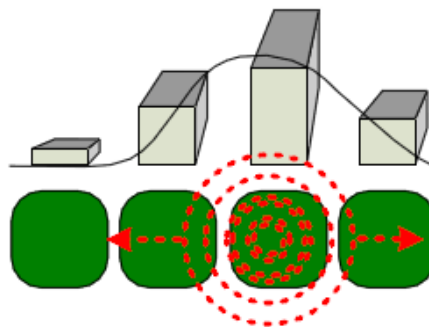


Figura 35 Resposta da Régua Capacitiva ao Toque

Na Figura 35 está representada a resposta da régua capacitiva, composto por um conjunto de 4 transdutores, ao movimento do dedo sobre a faixa. O número de posições em que se pode dividir a régua está diretamente relacionado com a sensibilidade de cada sensor que o constitui. Ou seja, quanto mais sensível for o sensor, mais distintos serão os valores de capacidade apresentados pelas diferentes zonas de toque. Contudo, não convém que o sensor seja demasiado sensível pois

este poderá começar a detetar a presença do dedo por proximidade e não por toque direto na régua capacitiva.

Resumindo, quanto maior for a sensibilidade do sensor, maior será a variação da sua capacidade e, conseqüentemente, maior será o número de posições em que se pode dividir um sensor [14]. Contudo, este não deverá ser demasiado sensível para se evitar a sensibilidade a ruídos externos.

2.8. Conclusão

Os sensores capacitivos representam nos dias de hoje uma tecnologia em forte crescimento. A sua aplicação na deteção do toque humano está a estimular a sua aplicação em cada vez mais sistemas devido às suas numerosas vantagens face aos seus homólogos mecânicos.

Foram apresentados neste capítulo diferentes princípios de funcionamento que podem ser aplicados aos sensores capacitivos: o toque pode ser detetado por variação da capacidade própria ou por alteração na capacidade mútua entre transdutores ou utilizando a técnica das 3 placas metálicas ou podem-se utilizar superfícies capacitivas. As técnicas para ler um transdutor capacitivo também são bastante variadas: pela variação da frequência de ressonância, medindo os tempos de carga e descarga, medindo o atraso temporal, por transferência de carga, entre outros. Também existem diferentes formas de calibrar a sensibilidade ao toque por parte do transdutor: a área e a geometria dos transdutores, a proximidade de planos de *terra*, a espessura e o tipo da superfície de toque são alguns dos fatores que influenciam a capacidade de deteção do toque.

Contudo, como qualquer tecnologia, também a tecnologia capacitiva tem os seus problemas e limitações. A capacidade do sensor não é apenas composta pela capacidade variável com o toque, possui também capacidades parasitas que diminuem a sensibilidade ao toque. O efeito similar ao do dedo por parte da água pode levar à deteção de falsos toques. Este problema ou mesmo a incapacidade de detetar qualquer toque também pode ocorrer devido à presença de ruídos radiados, conduzidos e descargas electrostáticas. Mas existem técnicas tanto de *hardware* como de *software* que permitem contornar estas situações e permitem o correto funcionamento dos sensores capacitivos mesmo em ambientes hostis.

Assim sendo, as especificações de construção de sensores capacitivos dependem dos requisitos específicos de cada aplicação, nomeadamente o meio ambiente em que serão inseridos, o tempo de resposta, o consumo de energia, o número e o tipo de sensores capacitivos usados, entre outros. A boa escolha do *design* de *hardware*, desde a construção do transdutor aos circuitos de excitação e leitura, e dos algoritmos de *software*, para o tratamento e análise dos dados lidos, são fundamentais para a construção de um sensor robusto, flexível, estável e preciso.

3. Conjuntos de Desenvolvimento

Após o levantamento de informação respeitante aos diferentes métodos utilizados por alguns dos principais fabricantes na área (ver Tabela 2), foram escolhidos para conjuntos de desenvolvimento a tecnologia desenvolvida pela *Microchip*, *Atmel* e pela *Cypress*. O critério de seleção baseou-se sobretudo no conhecimento já adquirido sobre os microcontroladores destas empresas, ou seja, no Curso de Engenharia Electrónica e Telecomunicações da Universidade de Aveiro os alunos trabalham principalmente com microcontroladores da *Microchip* e a *Exatronic* trabalha e tem boas indicações dos microcontroladores da *Atmel*. A escolha da *Cypress* deveu-se ao facto de já se encontrar no mercado dos teclados capacitivos há bastante tempo e, portanto, possuir experiência na área. Contudo, o elevado custo do equipamento da *Cypress* levou ao abandono da utilização dessa solução no âmbito do trabalho de dissertação.

Neste capítulo é apresentada de uma forma detalhada o *hardware* e o *software* desenvolvido para cada conjunto de desenvolvimento.

3.1. PICDEM TOUCH SENSE 1 Development Kit

O conjunto de desenvolvimento da *Microchip* possui um teclado capacitivo com dez botões, uma régua capacitiva e um teclado direccional (*Wheel*). O comando do teclado capacitivo e da régua capacitiva é realizado por um PIC16F887, estando o comando do teclado direccional atribuído a um PIC16F677. A programação dos microcontroladores é realizada via ICSP™ utilizando um Programmer/Debugger (como o MPLAB PM3).

Como ferramenta de desenvolvimento de *firmware* usa-se o MPLAB X IDE software disponibilizado no sítio na Internet da *Microchip*.

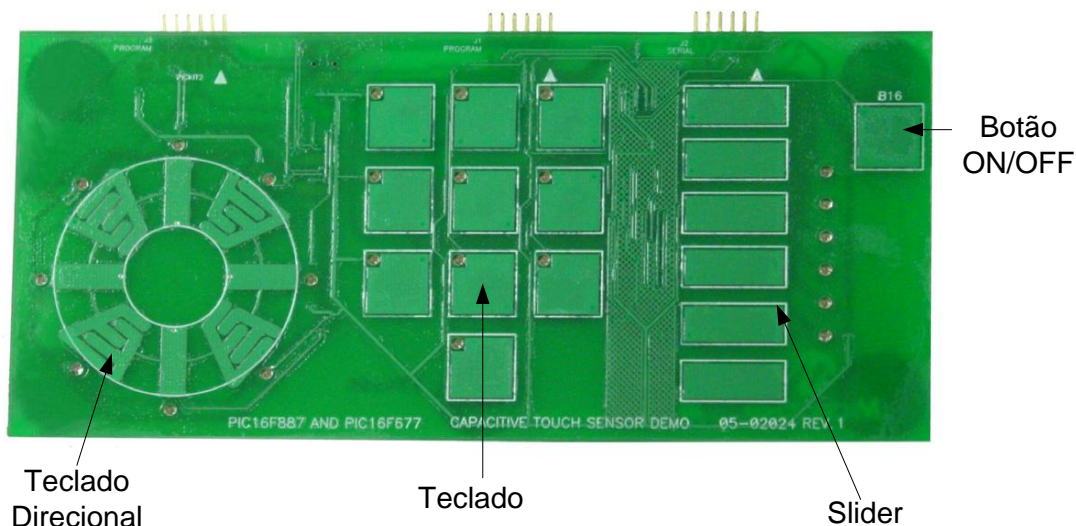
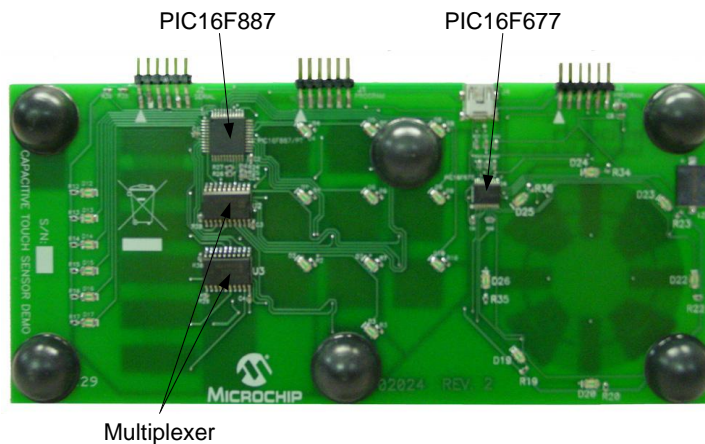


Figura 36 Vista Superior do PICDEM Kit



Multiplexer

Figura 37 Vista Inferior do PICDEM Kit

O *PICDEM Kit* vem ainda acompanhado por uma ferramenta de diagnóstico mTouch™ Diagnostic Tool Software e um PICKIT™ Serial Analyzer.

3.1.1. Hardware

3.1.1.1. Oscilador RC

O método de leitura usado pela *Microchip* determina a capacidade do transdutor através de um oscilador RC (circuito RC na Tabela 2). Para além do oscilador RC, são usados dois comparadores e uma *latch SR* para definir o sentido de carga ou descarga do condensador C_s . O esquema do circuito usado encontra-se representado na Figura 38 [28].

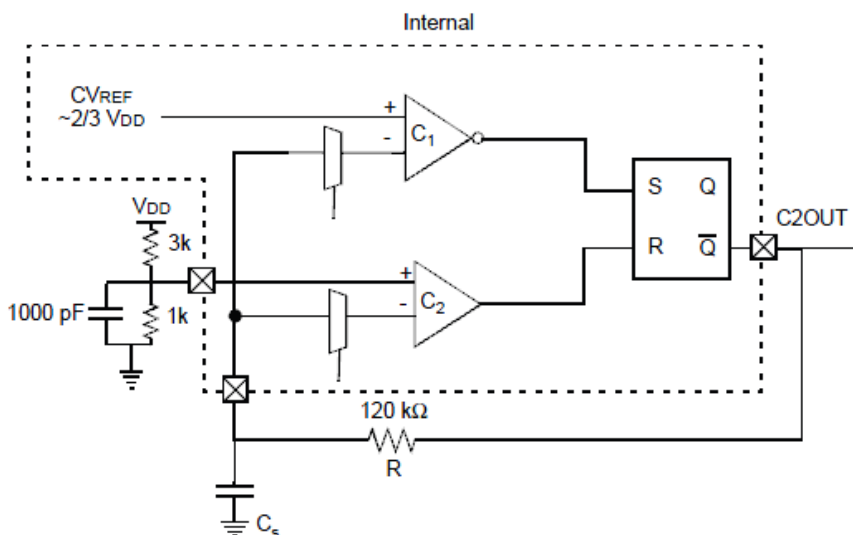


Figura 38 Oscilador RC

Na entrada positiva do comparador C_1 é aplicado um valor de tensão de referência (definido por *software*) que define o limite superior de carga do condensador do transdutor e na entrada positiva do comparador C_2 é aplicado um valor de tensão de referência (definido por um

divisor resistivo) que define o valor mínimo de carga (exceto no início em que a capacidade se encontra completamente descarregada). A saída do comparador C_1 encontra-se negada.

Para efeitos explicativos, considere-se que o sinal lógico '1' corresponde ao valor de tensão positivo da alimentação do circuito (V_{DD}) enquanto que o '0' lógico representa os 0 volts.

Tabela 4 Tabela de Verdade Latch SR

| S | R | \Q | Operação |
|---|---|---------------------------------------|----------|
| 0 | 0 | Saída mantém o último valor conhecido | |
| 0 | 1 | 1 | RESET |
| 1 | 0 | 0 | SET |
| 1 | 1 | 1 | RESET |

O funcionamento do circuito é descrito da seguinte forma: começando com a capacidade do transdutor C_s completamente descarregada, as entradas positivas dos comparadores terão maior tensão que as entradas negativas, o que implicará um '0' na entrada *set* (S) e um '1' na entrada *reset* (R) da latch. Estas entradas forçam a saída $\backslash Q$ a '1' iniciando o processo de carga do condensador. Quando a tensão aos terminais do condensador atingir o valor mínimo de tensão, a saída do comparador C_2 transita para '0', no entanto não terá qualquer impacto no funcionamento do circuito uma vez que $\backslash Q$ continuará a '1' (continua a carga do condensador). Quando o valor de tensão no condensador atingir o limite superior, a entrada S da *latch* passará a '1' e consequentemente $\backslash Q$ a '0'. O sentido da corrente inverte e começa o processo de descarga do condensador (a entrada S passa novamente a '0' assim que a tensão no terminais de C_s for inferior à tensão aplicada na entrada positiva de C_1 mas, isso não implicará uma transição no nível da saída da *latch*, como se pode verificar na Tabela 4. Quando o valor de tensão deste atinge o valor mínimo, a entrada R da latch transita para '1' e consequentemente $\backslash Q$ a '1'. Começa novamente o processo de carga e os passos descritos repetem-se até que o sistema seja desligado. A variação da tensão aos terminais do condensador durante o processo anteriormente descrito pode ser visualizada na Figura 39 [28].

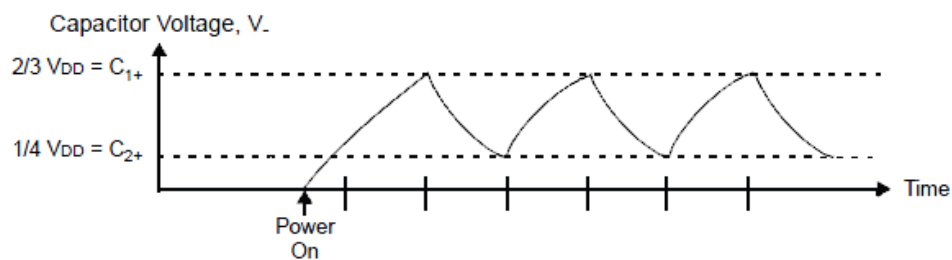


Figura 39 Ciclos de carga e descarga do Condensador

A frequência deste processo de carga e a descarga de C_s vai ser determinado pela constante de tempo τ definida por:

Equação 17 Constante de Tempo

$$\tau = R \times C_s$$

Esta constante representa o tempo que demorará a que a capacidade atinja 63% do seu valor máximo (ao fim de 5 constantes de tempo a diferença entre a capacidade e o seu valor final será inferior a 1%). Assim, sem qualquer toque, a capacidade do transdutor terá uma constante de tempo de $\tau_1 = R \times C_p$. Quando o transdutor é tocado por um dedo haverá uma alteração na constante de tempo que passará a ser $\tau_2 = R \times (C_p + C_d)$, ficando $\tau_2 > \tau_1$. Ou seja, devido à presença do dedo, o processo de carga e descarga da capacidade será mais longo, fazendo com que o circuito oscile com uma frequência menor. Resumindo, à saída da latch SR estará presente uma onda quadrada com uma frequência proporcional à capacidade do transdutor.

3.1.1.2. Frequência de Oscilação

Como referido anteriormente, na saída da *latch SR* está presente uma onda quadrada com uma frequência de oscilação que muda com a variação da capacidade do transdutor. Esta é ligada à entrada do TIMER1 (T1CKI pin) do PIC16F para se usar essa onda como um fonte de relógio para o *Timer/Counter*.

O registo do TIMER1 é incrementado em todas as transições positivas da onda quadrada, permitindo a contagem do número de pulsos. É necessário ainda o uso de um segundo *Timer* (TIMER0) alimentado por um sinal de relógio fixo. O TIMER0 é configurado para gerar uma interrupção quando o seu registo (de 8 bits) atinge o valor máximo de contagem (todos o bits a '1'). Dessa forma, vão ocorrer interrupções com um período fixo onde é lido o registo do TIMER1. Pode-se então detetar alterações na frequência de oscilação da onda quadrada proveniente do circuito de oscilação observando as mudanças no valor do registo do TIMER1.

A capacidade existente no transdutor sem a ocorrência de um toque gera uma onda com uma frequência de oscilação correspondente que vai incrementando o registo do TIMER1. Quando o TIMER0 gera uma interrupção, o valor do registo do TIMER1 é lido e guardado para futura referência. Quando há um toque do dedo, a capacidade do transdutor aumenta, diminuindo a frequência de oscilação. Quando ocorrer uma interrupção, é lido novamente o valor do registo do TIMER1. O valor do registo lido na ocorrência de um toque é menor comparativamente à ausência deste. Usando um algoritmo de *software* para comparação do valor deste registo ao longo do tempo é possível determinar quando é que há ou não um toque.

Os procedimentos descritos em 3.1.1.1 e 3.1.1.2 são alargados a múltiplos botões capacitivos utilizando multiplexers.

3.1.1.3. Régua Capacitiva e Teclado Direcional

A régua capacitiva e o teclado direcional são compostos por oito e quatro botões capacitivos simples, respetivamente, aplicando-se o mesmo processo de leitura descrito nas duas secções anteriores.

3.1.2. Firmware

3.1.2.1. Versão do Fabricante

Na versão de *firmware* pré-programada nos microcontroladores PIC16F determina-se as mudanças de frequência no circuito de oscilação RC através do uso de duas variáveis (*average* e

raw) e uma constante (*trip*). A variável *average* possui o valor médio das últimas 16 amostras lidas no registo do TIMER1. O uso de um valor médio permite reduzir a influência de variações da temperatura e de outros ruídos do ambiente. A variável *raw* possui o valor da última amostra obtida do registo do TIMER1. A constante *trip* é um valor limite para detecção do toque, isto é, define a diferença mínima entre as duas variáveis referidas para que se considere o toque no sensor como verdadeiro.

Na Figura 40 está representado o diagrama geral do algoritmo de *software* para a determinação da ocorrência de toque.

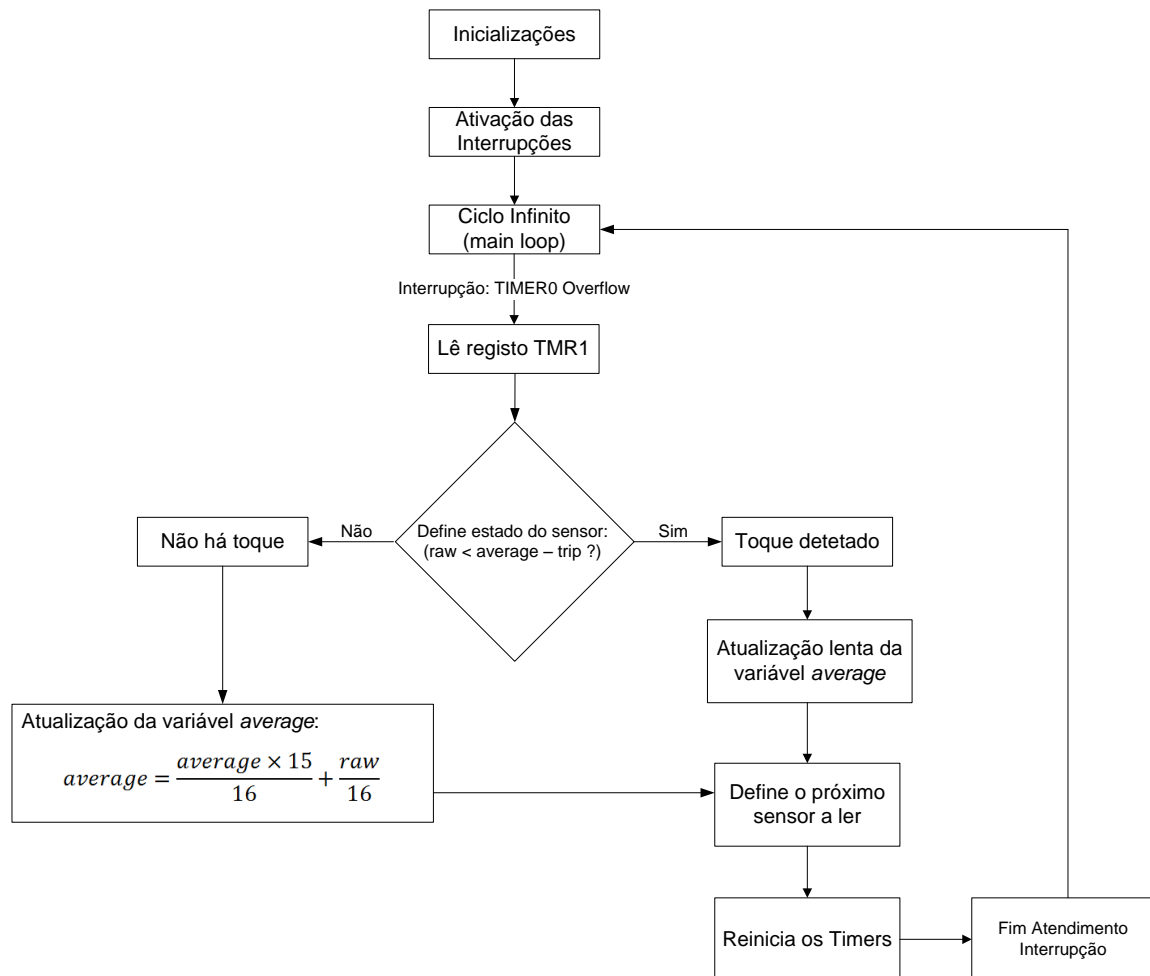


Figura 40 Diagrama do Algoritmo Software do Fabricante

O algoritmo de *software* começa por efetuar todas as inicializações necessárias para o funcionamento pretendido do sistema, isto é, os registos do microcontrolador são configurados de acordo com o modo de operação pretendido, são inicializados os periféricos, são definidas todas as constantes necessárias para análise do nível da saída do sensor (definição das variáveis *trip* de cada sensor capacitivo) e por fim são ativadas as interrupções.

Quando é gerada uma interrupção pelo TIMER0, a variável *raw* é atualizada com o valor atual do registo do TIMER1 e segue-se a análise do nível da saída do sensor capacitivo. Se a

diferença entre a variável *average* e a constante *trip* for maior que o valor da variável *raw*, houve um toque no sensor. Caso contrário, decide-se que não houve nenhum toque.

A forma de atualização da variável *average* depende do nível da saída em que se encontra o sensor. Se não houve toque, a variável *average* do sensor é atualizada em todos os ciclos de análise desse sensor segundo um filtro IIR (Figura 41).

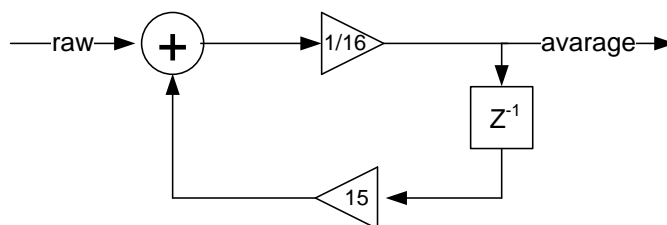


Figura 41 Atualização da variável *average*

Quando existe um toque, para o sensor onde este é detetado, é realizada uma atualização lenta da variável *average*, isto é, só de N em N ciclos se realiza a operação definida na Figura 41. O número de ciclos de intervalo entre atualizações é definido nas inicializações do sistema. Com esta solução, pretende-se que o sensor permaneça num nível de “tocado” apenas durante um intervalo de tempo finito, com uma duração definida pela manipulação da variável N (quanto maior for N, maior será o intervalo de tempo).

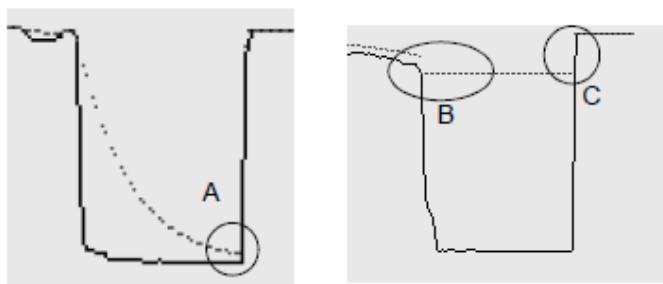


Figura 42 Atualização da variável *average*

Na Figura 42 [29] estão representadas duas situações distintas de atualização da variável *average* quando é detetado um toque: na imagem da esquerda, a variável *average* é atualizada de uma forma lenta, aproximando-se ao longo do tempo da variável *raw*, na imagem da direita, a variável *average* não é atualizada nesse período. Numa situação em que se toca no sensor por um período extremamente longo, um algoritmo segundo a imagem da direita define o sensor no nível de “tocado” durante toda a duração do toque enquanto num algoritmo segundo a imagem da esquerda, a diferença entre *raw* e *average* diminui com o passar do tempo e acaba, eventualmente, por ser menor que *trip*, transitando portanto, o sensor do nível de “tocado” para “não tocado”, mesmo que o dedo continue a pressionar o sensor. Esta última solução é útil quando os sensores capacitivos se encontram sujeitos a perturbações do ambiente. Tome-se como exemplo a situação em que o sensor se encontra ao ar livre e começa a chover, acumulando-se água sobre este. Como a água provoca um efeito semelhante ao dedo humano no sensor, um algoritmo segundo a imagem da esquerda permite ao sistema uma adaptação ao meio, evitando-se a inutilização do teclado.

No final da rotina de atendimento a interrupções é define-se qual o próximo sensor para análise, limpa-se o registo do TIMER1 e reinicializa-se o TIMER0.

3.1.2.2. *Firmware com base percentual*

A versão de *firmware* apresentada nesta secção distingue-se da versão apresentada em 3.1.2.1 por definir o nível da saída do sensor com base numa análise percentual da variação do sinal do sensor e não de valores absolutos. Uma análise percentual, embora exija um maior esforço computacional (há necessidade de efetuar divisões), facilita o processo de calibração, ou seja, o programador não precisa de ter conhecimento da quantidade de variação do sinal (em termos absolutos) proveniente de cada sensor para efetuar a calibração, podendo inclusive definir um limiar percentual igual para todos os sensores (se a aplicação o permitir).

Esta versão conta ainda com um processamento baseado no botão (sensor) mais pressionado, por outras palavras, cuja variação percentual do seu sinal é a maior. Teoricamente permite resolver problemas no funcionamento do teclado capacitivo em ambientes onde o *crosstalk* entre os sensores é bastante forte (como acontece por exemplo quando o teclado se encontra molhado).

O algoritmo começa por efetuar todas as inicializações necessárias para que o sistema funcione como pretendido, ou seja, faz a configuração de registos, definição de constantes, entre outras.

De seguida, ativam-se as interrupções associadas ao TIMER0 e inicia-se o processo infinito de leitura dos sensores. Quando é gerada uma interrupção pelo TIMER0, a variável *raw* é atualizada com o valor atual do registo do TIMER1 e calcula-se o valor percentual da diferença entre *average* (valor médio das amostras retiradas no passado) e *raw*. Se a percentagem for superior a um limiar ON é definido a ocorrência de um toque (sensor entra no nível de pressionado). Caso contrário, verifica-se se a percentagem é inferior ao limiar OFF. Em caso afirmativo, é definido que não há nenhum toque no sensor em análise, em caso negativo, o nível da saída do sensor permanece inalterado. A existência de uma histerese de limiares, limiar ON e limiar OFF, entre as transições de “pressionado” para “não pressionado”, e vice-versa, tem como objetivo a diminuição da influência das perturbações externas (como picos na tensão de alimentação ou pequenos erros na leitura do sensor) que poderiam causar transições momentâneas.

Tal como na versão apresentada em 3.1.2.1, a atualização da variável *average* depende do nível da saída em que se encontra o sensor. Se não houve toque, a variável *average* do sensor é atualizada em todos os ciclos de análise desse sensor, segundo um filtro IIR (Figura 41). Caso contrário, é realizada uma atualização lenta da variável *average*, isto é, só de N em N ciclos é realizada a atualização da variável *average*.

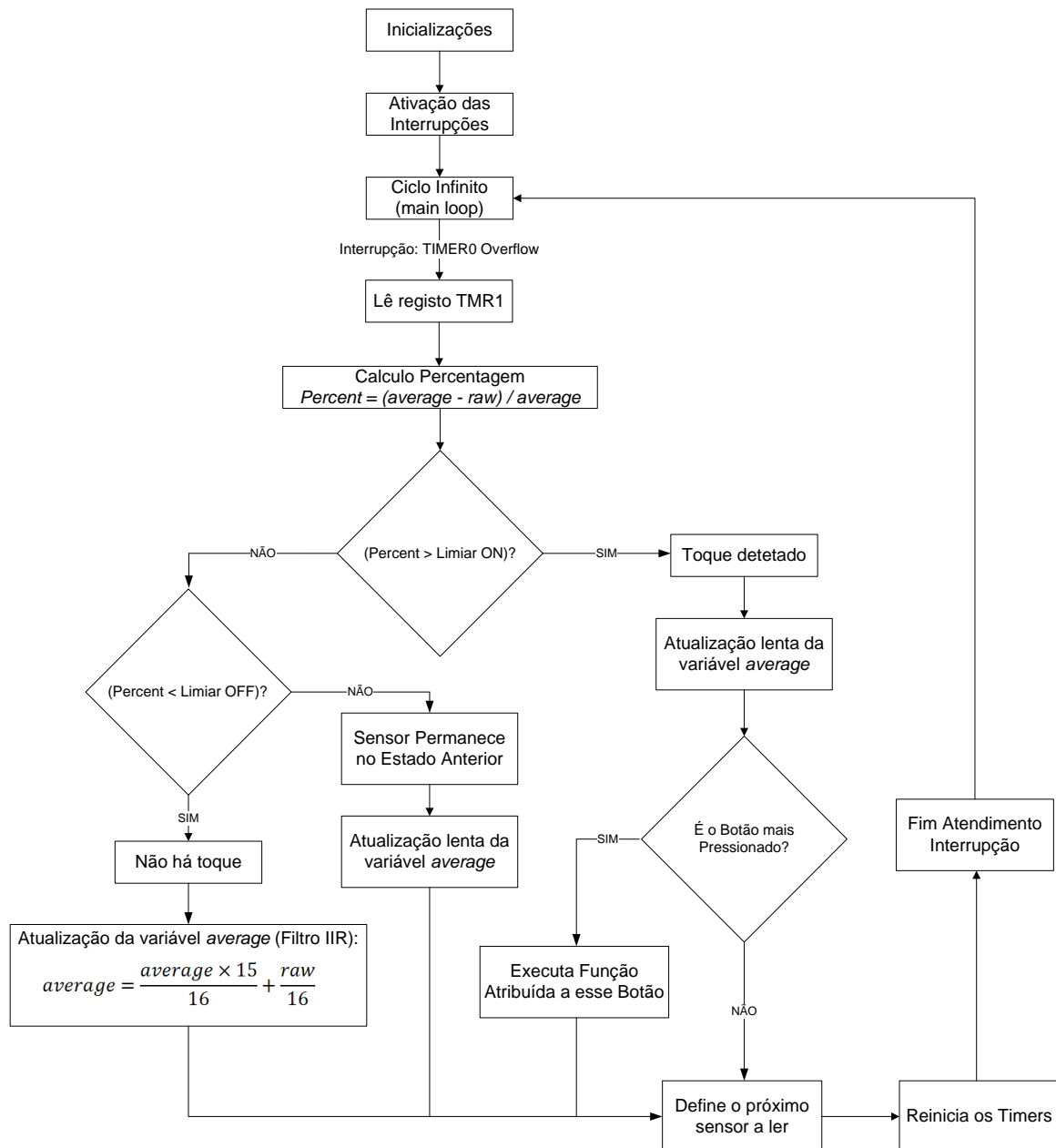


Figura 43 Diagrama do Algoritmo Software

Quando um sensor é definido como tocado, faz-se ainda uma análise baseada no botão (sensor) mais pressionado, isto é, verifica-se se ele é o sensor com a variação de sinal (nível percentual) maior. Se for verdade, é executada a tarefa correspondente a esse sensor, se não, a tarefa é simplesmente ignorada.

Concluído o cálculo do nível da saída do sensor, define-se o próximo sensor sujeito a análise, limpa-se o registo do TIMER1 e reinicializa-se o TIMER0.

3.2. Atmel XPLAIN Kit

O conjunto de desenvolvimento da *Atmel* é composto por uma placa AVR Xplain equipada com o microcontrolador ATxmega128A1 e um teclado capacitivo *Qtouch Xplained* composto por dois botões, uma régua capacitiva e um *Wheel*.

A programação do microcontrolador é feita via JTAG utilizando-se o programador AVR Dragon. Como ferramenta de desenvolvimento de *firmware* usou-se o AVR Studio 5 *software* disponibilizado no sítio na Internet da *Atmel*. Como instrumento de diagnóstico usou-se o AVR Qtouch Studio.

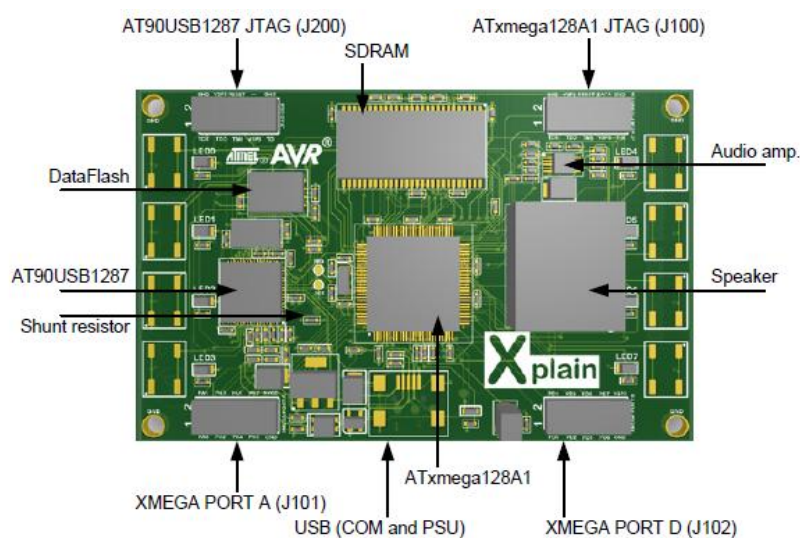


Figura 44 Placa AVR Xplain

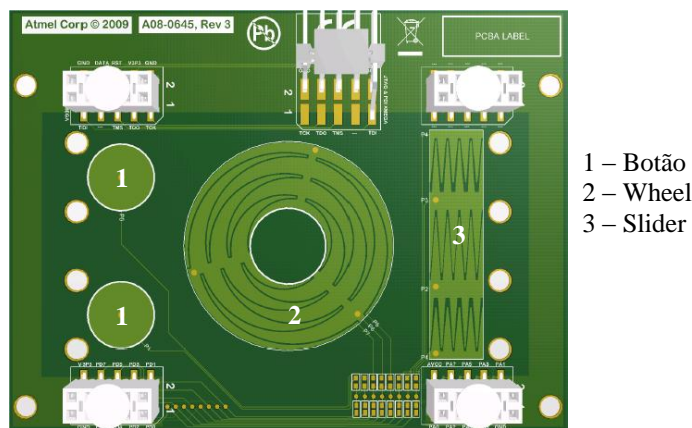


Figura 45 Qtouch Xplained

3.2.1. Hardware: QTOUCH

A tecnologia *QTouch* da *Atmel* determina a capacidade do sensor utilizando um processo de transferência de carga. O sensor é composto por uma única placa condutora (transdutor) que funciona como uma ligação em aberto que cria um campo elétrico em todas as direções. A segunda placa é formada pelo restante circuito e a *Terra*.

O circuito de leitura do transdutor é formado por um divisor capacitivo, composto pelo transdutor capacitivo e um condensador de amostragem $C_{sampling}$ (com uma capacidade de cerca de 1000 vezes maior à do transdutor). O *chip*, ao qual o divisor se encontra ligado, gera pulsos de tensão, causando correntes elétricas que fluem através dos condensadores, carregando-os com uma quantidade de carga proporcional às capacidades e, assim sendo, variável com a variação da capacidade do transdutor capacitivo. Neste processo, a capacidade do transdutor é carregada e descarregada em cada pulso gerado pelo *chip*. Por outro lado, a tensão presente aos terminais de $C_{sampling}$ aumenta pulso a pulso até atingir um valor de referência (V_{ih}).

A informação processada pelo algoritmo de *software* corresponde ao número de ciclos de transferência de carga necessários para que a tensão aos terminais de $C_{sampling}$ atinja V_{ih} .

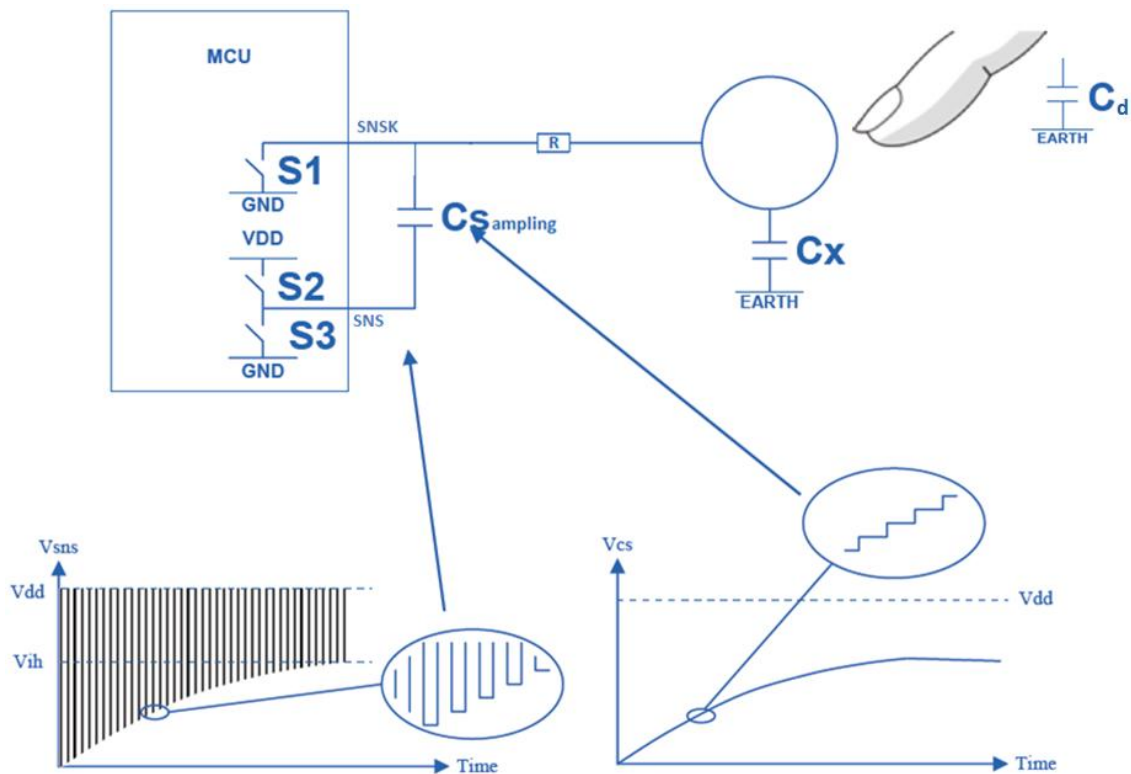


Figura 46 Método de aquisição QTouch da Atmel

Na Figura 46 [30] encontra-se representado o processo usado para a leitura do transdutor. Pode-se explicar o método nos seguintes passos:

1. Antes de se iniciar uma nova leitura, abre-se S2 e fecha-se S1 e S3, conectando os terminais dos condensadores à *terra* do circuito (GND) para que os condensadores fiquem descarregados;
2. Abre-se S1 e S3 e fecha-se S2. Será gerado um pico de tensão, carregando a capacidade do transdutor C_x através de $C_{sampling}$. Segundo as leis de Kirchhoff, a corrente que atravessa $C_{sampling}$ é a mesma que atravessa C_x , logo a carga acumulada em ambos os condensadores será a mesma;

3. Após um período de tempo fixo, abre-se S2 e fecha-se S1. S3 permanece aberto. Descarrega-se a capacidade do transdutor e verifica-se o valor de tensão aos terminais de C_{Sampling} . Se este for superior a V_{ih} , dá-se por concluído o processo de leitura do transdutor e segue-se a análise dos dados. Caso contrário, incrementa-se o valor do número de transferências de carga já efetuadas e repete-se o processo a partir do ponto 2.

Devido ao toque, a capacidade total do transdutor torna-se maior porque é adicionada uma capacidade em paralelo com capacidade do transdutor, traduzindo-se numa maior quantidade de carga transferida para os condensadores em cada ciclo. Reduz-se desta forma o número de transferências necessárias para que o C_{Sampling} apresente aos seus terminais a tensão de referência V_{ih} . A variação do número de transferência de carga necessária é proporcional a C_d .

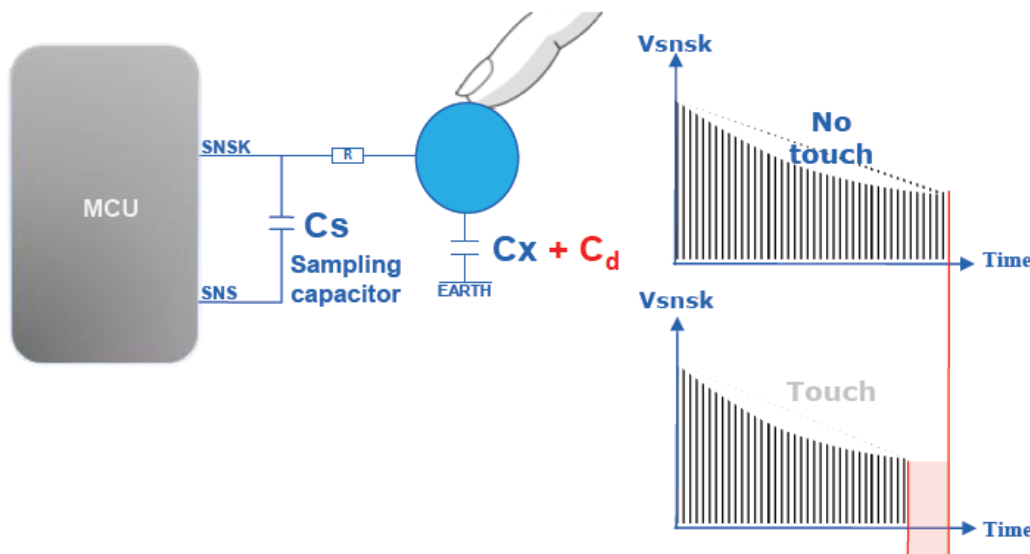


Figura 47 Influência do toque no método *QTouch* da *Atmel*

Quando o número de transferências desce abaixo de um determinado valor comparativamente a uma referência, é decidido a existência de um toque [30].

3.2.1.1. Régua Capacitiva

Na construção de réguas capacitivas é usado um conjunto de três transdutores (dois transdutores inteiros e duas metades) espacialmente interpolados, tal como se encontra demonstrado na Figura 48 [31].

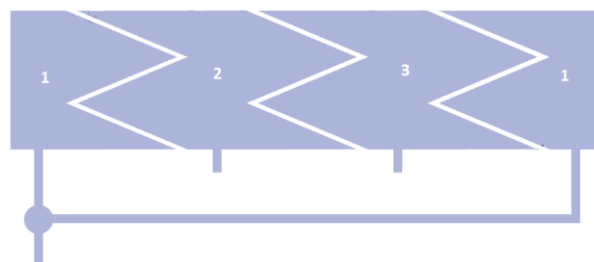


Figura 48 Régua Capacitiva Constituída por 3 Transdutores

Este método utilizado pela *Atmel* não utiliza, como no caso da *Microchip*, uma abordagem *ON/OFF* para os sensores constituintes da régua capacitiva. É realizado antes uma análise analógica da intensidade do sinal em cada sensor e a posição do dedo na régua capacitiva é determinada por uma técnica de quantização.

Como se pode observar na Figura 49, um toque do dedo numa posição da régua capacitiva produz uma variação de sinal em todos os sensores. Analisando o nível da variação em cada sensor, determina-se a posição do dedo. O número de posições que uma régua capacitiva é capaz de determinar depende do número de bits de resolução que o dispositivo possibilita (2 a 8 bits, o que permite a definição de 4 a 256 posições com 3 sensores).

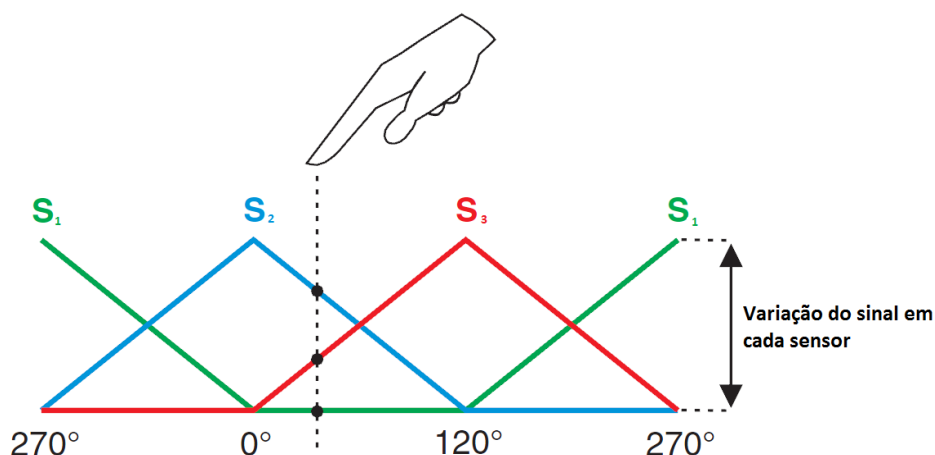


Figura 49 Variação ideal do sinal dos sensores com a passagem do dedo

A *Atmel* recomenda que réguas capacitivas espacialmente interpoladas não possuam um comprimento superior a 60 milímetros de forma a se evitar de linearidade da régua capacitiva. Se a aplicação requerer o uso de réguas maiores, deve-se usar réguas capacitivas interpoladas com resistências. Neste método, são utilizados mais do que três transdutores no total, contudo, apenas 3 deles estão diretamente ligados ao *chip*. Os restantes transdutores encontram-se ligados entre si através de resistências que garantem o efeito de interpolação elétrica [32].

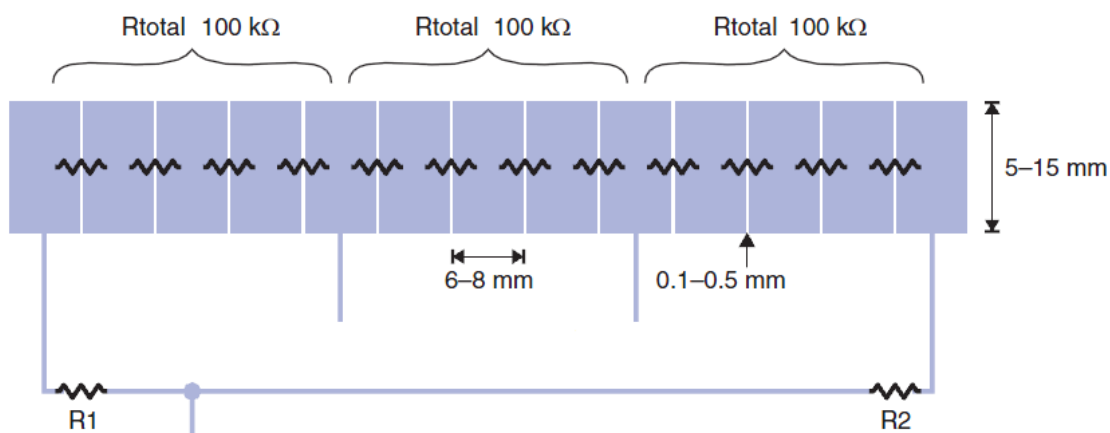


Figura 50 Régua Capacitiva Interpolada com resistências

Os métodos descritos anteriormente são também aplicados às *Wheels*.

3.2.2. *Hardware: QMATRIX*

A tecnologia *QMatrix* da *Atmel*, tal como a *QTouch*, usa um processo de transferência de carga para detetar variações na capacidade do sensor. A diferença entre os dois métodos encontra-se essencialmente no transdutor do sensor capacitivo, ou seja, o *QMatrix* usa um par de transdutores por cada sensor. Um dos transdutores é usado como emissor, que emite pulsos de carga, e o outro como recetor, que acopla com o emissor através da superfície de toque. Embora haja um acoplamento, nenhuma carga real é transferida através da superfície de toque entre os dois transdutores. No entanto, vão sendo acumuladas cargas no transdutor emissor que geram um campo elétrico variável no tempo. Surge ainda um campo magnético entre os transdutores como se existisse uma corrente elétrica a fluir entre os transdutores. Esta corrente “fictícia” é chamada de Corrente de Deslocamento de Maxwell.

Maxwell procurou introduzir o conceito de *corrente de deslocamento* como uma forma de compatibilizar a Lei de Ampère com a Lei da Conservação da Carga Elétrica. Considere-se o circuito de Ampère apresentado na Figura 51 [33] centrado num elemento do fio que liga a fonte de alimentação (bateria) a uma das placas do condensador.

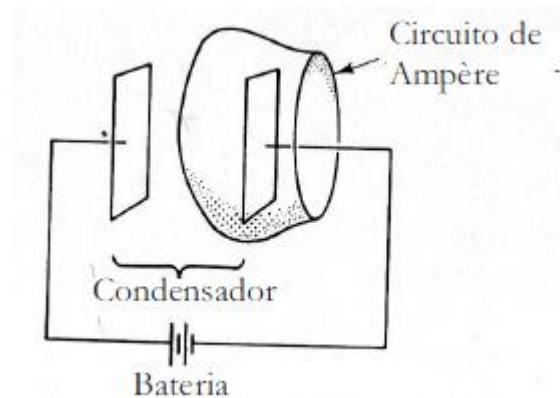


Figura 51 Circuito de Ampère

“A lei de Ampère, na sua forma integral, afirma que a circulação do campo magnético no circuito de Ampère é simplesmente proporcional à corrente que atravessa uma superfície qualquer assente no circuito de Ampère. É precisamente aqui que reside o problema na aplicação da lei de Ampère a este problema: é que, enquanto durar a carga do condensador, as superfícies intersectadas pelo fio que liga a bateria ao condensador são atravessadas pela corrente I , enquanto que as superfícies que atravessam o dielétrico, assente no mesmo circuito de Ampère, não são atravessadas por qualquer corrente. Maxwell investigou então uma forma de compatibilizar a Lei de Ampère com a Lei da Conservação da Carga Elétrica, alterando a Lei de Ampère para que esta contivesse a Lei da Conservação da Carga Elétrica”. [34]

Chegou-se assim à lei de Ampère modificada (Lei de Ampère-Maxwell) na forma diferencial:

Equação 18 Lei de Ampère-Maxwell na forma diferencial

$$\nabla \times B = \mu_0 \times J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$$

Ou na forma integral (por aplicação do teorema de Stokes):

Equação 19 Lei de Ampère-Maxwell na forma integral

$$\oint B \cdot dl = \mu_0 \int (J_C + J_D) \cdot dS = \mu_0 I_{int} + \mu_0 \epsilon_0 \int \frac{\partial E}{\partial t} \cdot dS$$

Onde o termo $\frac{\partial E}{\partial t}$ é proporcional à corrente de deslocamento.

Olhando agora para a Figura 52 e atendendo ao descrito anteriormente, pode-se explicar o funcionamento da tecnologia *QMatrix* da seguinte forma: devido à emissão de pulsos é acumulada carga no transdutor emissor X. Considerando que a carga aí acumulada tem sinal positivo, surge no transdutor recetor Y uma quantidade de carga igual mas de sinal contrário à do emissor, “transportada” pela corrente de deslocamento. Essa carga, proporcional à capacidade formada pelos transdutores X e Y, é armazenada num condensador de amostragem.

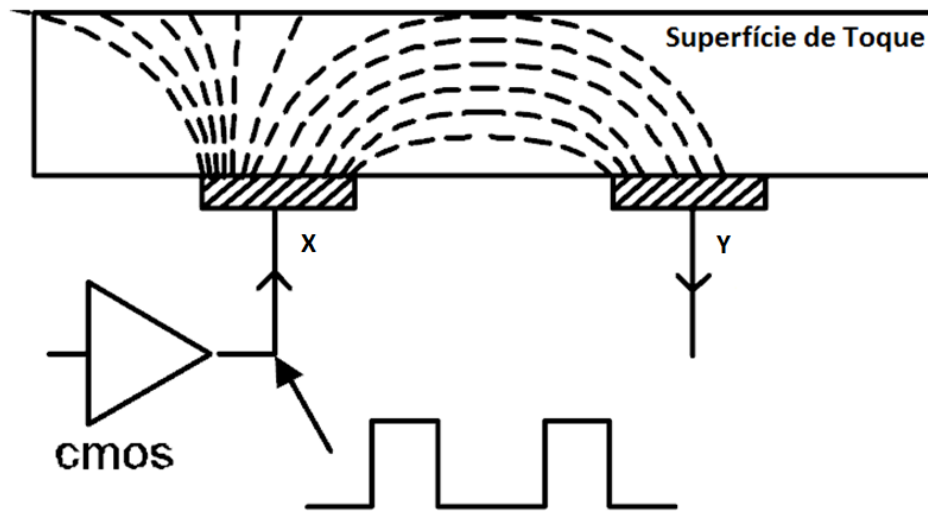


Figura 52 Princípio de Funcionamento do *QMatrix*

A capacidade formada pelo transdutor emissor e o transdutor recetor será influenciada por fatores externos como o toque do dedo devido à alteração do meio dielétrico entre os dois transdutores. Neste caso, o toque não introduz uma nova capacidade paralela à do sensor mas influencia a quantidade de carga “transferida” por alteração das propriedades dielétricas do meio compreendido entre os dois transdutores.

Quando se toca na superfície de toque, o campo elétrico entre os dois transdutores altera-se, isto é, o corpo humano “atrai” para si parte do campo elétrico reduzindo a quantidade de carga “transferida” entre transdutores e o toque é detetado (Figura 53).

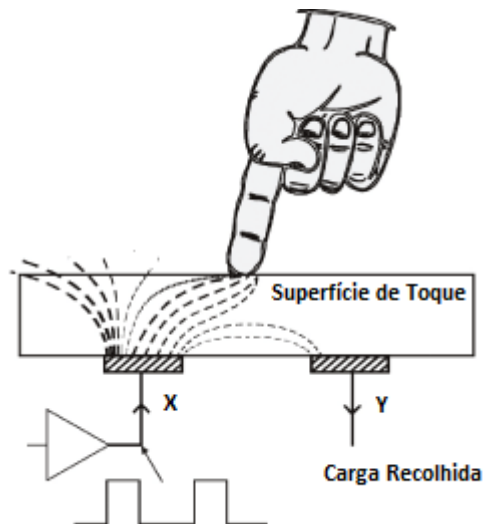


Figura 53 Influência do dedo no campo elétrico entre os transdutores

3.2.3. Firmware

O microcontrolador da *Atmel* não se encontra pré-programado, sendo necessário criar um *firmware* de raiz mas, devido à existência de uma biblioteca específica para a tecnologia *QTouch*, o seu desenvolvimento é bastante facilitado.

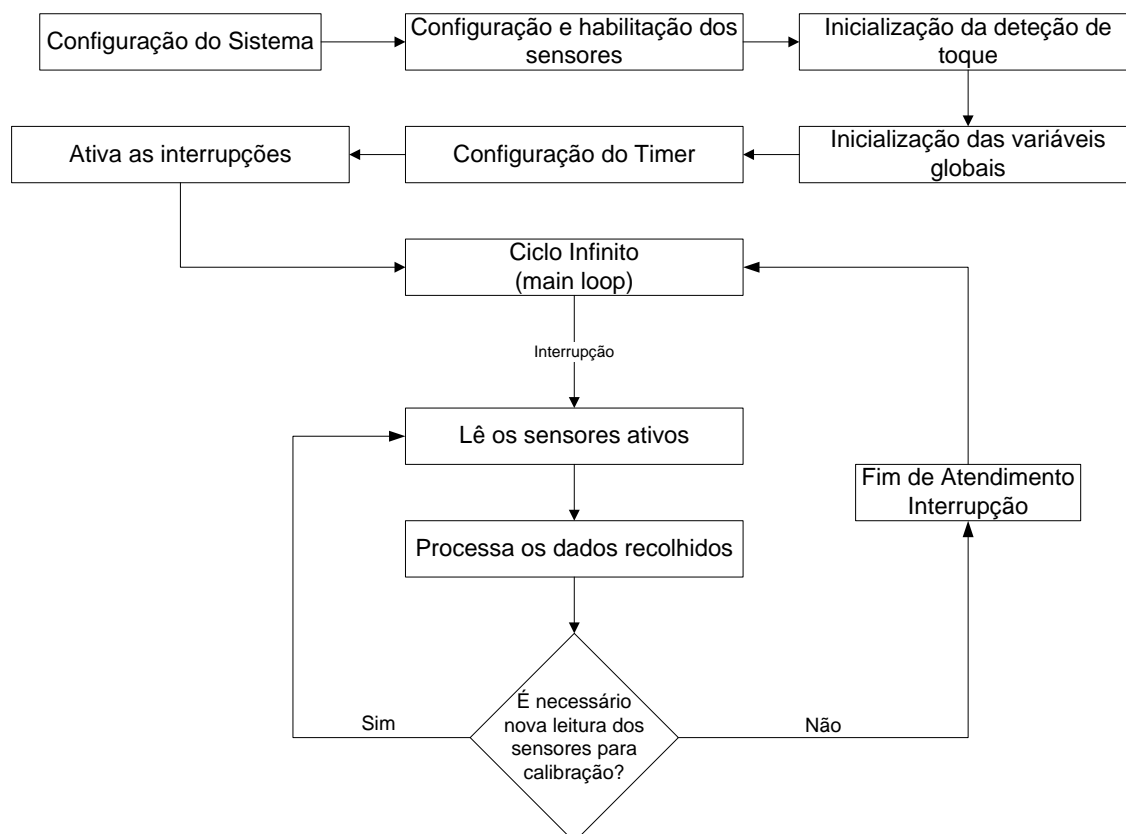


Figura 54 Diagrama do Algoritmo de Software

O algoritmo começa por realizar as configurações necessárias no sistema, nomeadamente a definição dos portos (pins), a frequência de relógio interna de operação, entre outros.

De seguida, ativam-se os canais do microcontrolador que são utilizados pelos sensores do teclado capacitivo e define-se o seu tipo (botões, réguas capacitivas ou *wheels*), ativa-se a capacidade de leitura dos sensores nos canais anteriormente habilitados.

A biblioteca fornecida pela *Atmel* para a tecnologia *QTouch* possibilita a definição de parâmetros que permitem uma calibração automática do sistema em *run-time*, constituindo uma excelente ferramenta contra o aparecimento de falso toques e à adaptação do sistema às mudanças ambientais:

- a) É possível definir uma constante (denominada no inglês por *detect integrator - DI*) que funciona como um filtro contra a ocorrência de falsos toques momentâneos, isto é, uma variável é incrementada de cada vez que a variação do sinal proveniente do sensor ultrapassar o limiar de deteção e assim permanecer durante um número específico de aquisições, sem descer abaixo desse limiar. Quando essa variável atinge o valor de *DI*, o sensor é finalmente declarado como tocado. Caso a variação do sinal desça abaixo do limiar de deteção antes de a variável atingir o valor de *DI*, a variável é reiniciada. Este processo pode ainda ser aplicado à situação de libertação do botão;
- b) É possível configurar um parâmetro temporal que limita o período de tempo máximo que um sensor pode estar no nível de pressionado. Por exemplo, se uma gota de água cai e permanece sobre um sensor capacitivo levando a uma deteção de toque, por um longo período de tempo, é importante que o sistema consiga calibrar-se automaticamente à situação após um curto período de tempo, recuperando a sua funcionalidade;
- c) Os parâmetros temporais para ajustamento de valores de referência (denominado em inglês, *positive and negative drift*) definem períodos de tempo que o sistema deve cumprir entre medições para calibração de valores de referência. Estes ajustamentos permitem compensar por exemplo os efeitos da variação da temperatura ambiente ou de alterações nas características físicas do sensor. Este método de compensação ocorre apenas em períodos temporais em que nenhum toque é detetado;
- d) Se durante a normal operação do sistema ocorre uma grande variação do sinal proveniente de um sensor, no sentido oposto à variação imposta por um toque, é provável que haja uma situação de erro (possibilidade de existência de dados corrompidos). Há um parâmetro configurável (no inglês *positive recalibration delay - PRD*) que define o número de aquisições que esse sensor possui para se calibrar por *positive drift*. Se tal não ocorrer, o sensor é reiniciado e é novamente calibrado;
- e) Quando a variação do sinal do sensor ultrapassa o limiar de deteção, passando para o nível de tocado, o valor de limiar pode ser reduzido segundo uma percentagem definida num parâmetro denominado por histerese. O objetivo desta técnica

consiste em reduzir a possibilidade de o sensor alternar entre o nível de tocado e não tocado devido a perturbações ambientais;

- f) A biblioteca permite ainda agrupar conjuntos de sensores capacitivos, admitindo apenas a definição de um sensor como tocado nesse grupo, escolhendo aquele que possui a maior diferença de sinal face à referência (o sensor definido como tocado permanecerá nesse nível até que o seu sinal desça abaixo do limiar de deteção, mesmo que a variação de sinal de outro sensor se torne mais forte). Isto é útil nas aplicações onde sensores tenham de ser posicionados com muita proximidade entre si, aumentando o risco de ocorrência de situações de *crosstalk*, levando à deteção simultânea em vários sensores. Este processo é denominado pela *Atmel* como *Adjacent key Suppression – AKS*.

Como a velocidade do movimento humano é muito menor que a velocidade de funcionamento do microcontrolador, não é necessário efetuar constantemente leituras aos sensores. Configura-se um timer para gerar interrupções com um período de relógio fixo, onde a cada interrupção é feita a leitura de todos os sensores (permitindo poupar energia, o que é de especial interesse quando o sistema é alimentado por bateria).

Quando ocorre uma interrupção, os sensores são lidos e os valores recolhidos são processados. No final, é verificada a necessidade de realizar novas leituras para efeitos de calibração. Se sim, os sensores são novamente analisados. Se não, termina-se a rotina de atendimento à interrupção e retorna-se ao ciclo infinito até ocorrer nova interrupção.

3.3. Conclusão

Das diversas tecnologias já existentes para ler sensores capacitivos, foram escolhidos para alvos de testes a tecnologia baseada num oscilador RC da *Microchip* e a tecnologia baseada na transferência de carga da *Atmel*, mais concretamente a tecnologia *QTouch*. Com estes conjuntos de desenvolvimento pretende-se realizar testes e calibrações com o objetivo de utilizar estas tecnologias em aplicações do interesse da *Exatronic*, com vários tipos materiais para superfícies de toque e espessuras. O *firmware* utilizado nos conjuntos de desenvolvimento foi implementado para tornar o sistema suficientemente robusto às perturbações ambientais mais comuns.

4. Trabalho Experimental e Análise de Resultados: *Microchip*

Neste capítulo é apresentado o trabalho experimental executado, os resultados obtidos das experiências e a análise crítica desses resultados para o conjunto de desenvolvimento da *Microchip*, cujo método de leitura do transdutor se baseia num circuito oscilador RC.

Faz-se uma análise à influência da geometria do transdutor na resposta do sistema ao toque, por outras palavras, compara-se a resposta dada por um transdutor com geometria quadrada com outro de geometria retangular, compara-se a sensibilidade dos sensores ao contacto humano para diferentes materiais e espessuras da superfície de toque, estuda-se a influência da diferença entre as tensões de referência dos comparadores utilizados pelo sistema e, por fim, analisa-se a resposta do sistema a ambientes hostis, mais concretamente, testa-se o funcionamento do sistema na presença de água e junto a fontes que emitam radiações de radiofrequências como os telemóveis.

Os comentários efetuados neste capítulo têm como base a informação apresentada nos capítulos 2 e 3, a análise aos gráficos gerados pelas amostras lidas dos sensores capacitivos e, quando se achar conveniente, no cálculo da relação sinal-ruído do sistema. Uma análise da relação sinal-ruído permite obter uma boa estimativa da intensidade do sinal proveniente do sensor comparativamente à quantidade de ruído que afeta o sistema. A expressão utilizada para o cálculo desta relação é expressa na Equação 20 [10].

Equação 20 Relação Sinal-Ruído

$$SNR = \frac{\mu_U - \mu_P}{\sigma_U}$$

SNR representa a relação sinal ruído:

μ_U representa a média do sinal na ausência de um toque;

μ_P representa a média do sinal na presença de um toque;

σ_U representa o desvio padrão do sinal na ausência de um toque.

O numerador da Equação 20 representa a diferença média do sinal entre a ausência de toque e a presença de toque e o denominador representa o desvio padrão do ruído que afeta as leituras. Usando este processo de cálculo do SNR, a *Microchip* define uma Relação Sinal-Ruído de pelo menos 3.5 para que o sistema seja caracterizado como tendo um comportamento aceitável na deteção do toque [10].

Todas as experiências foram realizadas num ambiente não controlado, ou seja, à temperatura e humidade ambiente, numa sala onde existiam outras pessoas a trabalhar em computadores ligados à internet por wi-fi, entre outros fatores que estão presentes numa sala de trabalho comum.

4.1. Geometria do Transdutor

No capítulo 2.2.1 é referido que a geometria do transdutor, embora tenha influência na capacidade do sensor em detetar o toque, não pertence ao grupo de fatores que têm um maior

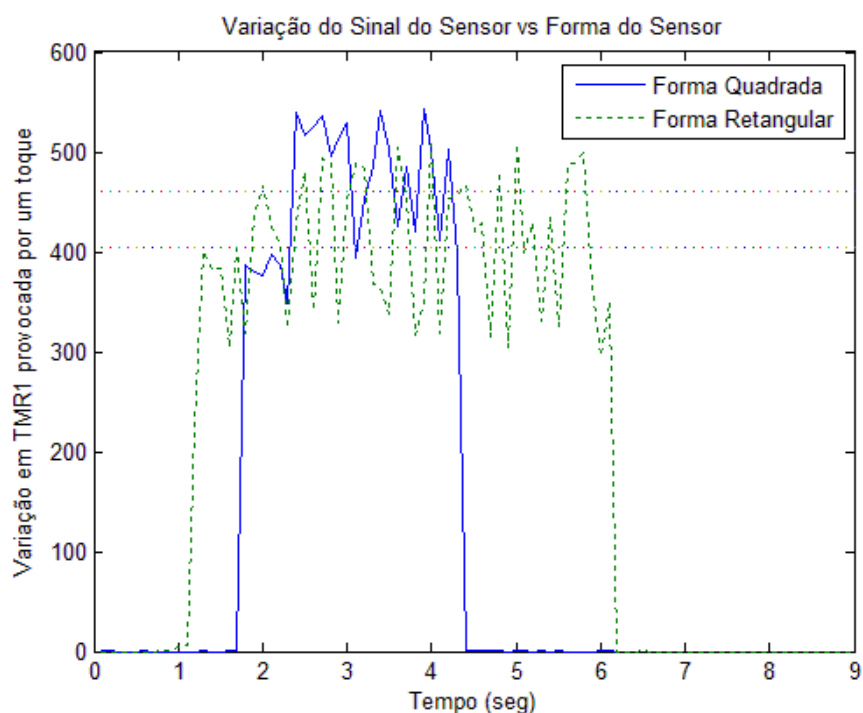


Figura 56 Variação do Sinal do Sensor devido a um Toque Direto (Transdutor a descoberto)

Os resultados apresentados na Figura 57 resultam de um toque no sensor utilizando uma superfície de toque de acrílico com 3 milímetros de espessura.

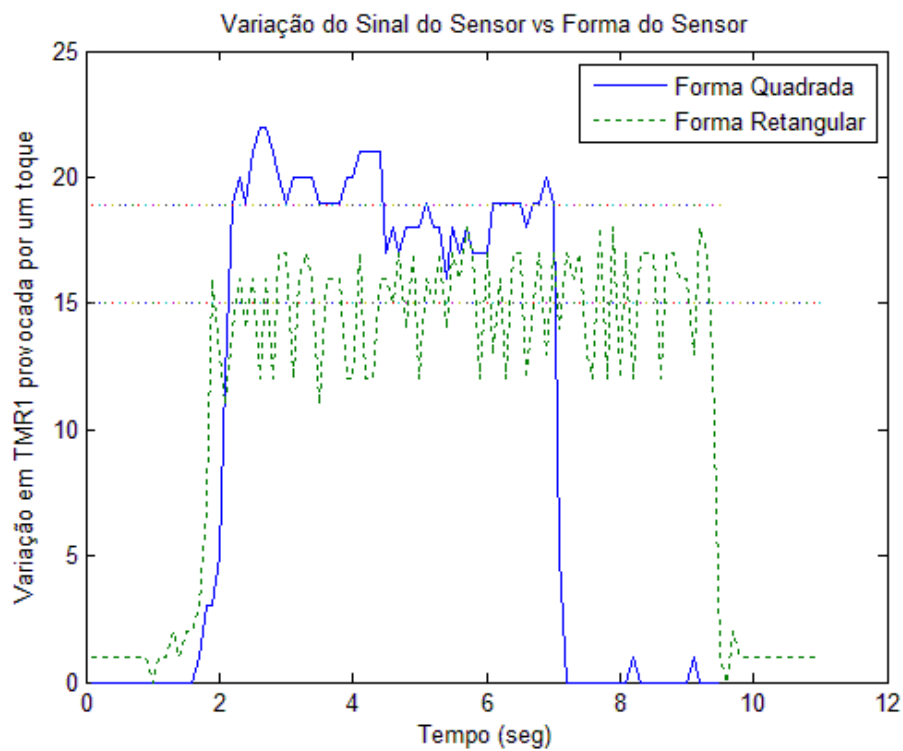


Figura 57 Variação do Sinal do Sensor devido a um Toque com uma Superfície em Acrílico (3mm de espessura)

Em ambos os casos, verifica-se que a interação humana tem uma maior influência no transdutor com geometria quadrada do que no transdutor com geometria retangular, o que acaba por ser um resultado esperado. Um sensor capacitivo é influenciado pela área efetiva do toque, por outras palavras, é influenciado pela área ocupada pelo dedo no transdutor. Se o transdutor for suficientemente grande para que durante um toque haja zonas que não interajam com o dedo, estas contribuem apenas para a formação de capacidades parasitas, diminuindo a capacidade de deteção do toque. Como se encontra referido em 2.4.1, deve-se procurar maximizar a capacidade variável e minimizar a capacidade parasita.

De facto, na calibração de um sistema com o objetivo de se obter a sensibilidade ao toque pretendida, não é comodo mudar constantemente a geometria do transdutor para se encontrar a solução que possua a maior sensibilidade ao toque, pois poderá implicar como exemplo a necessidade da alteração das pinturas existentes na superfície de toque. Para além disso e com base nos resultados obtidos e representados na Figura 56 e na Figura 57, verifica-se que a geometria não produz um impacto tão forte como por exemplo o facto de existir ou não uma superfície de toque entre o dedo e o transdutor: chega-se à conclusão pelos valores apresentados que a inserção de uma superfície do toque de 3 milímetros reduz a sensibilidade ao toque em mais de 90%, um valor muito superior ao imposto pela variação da geometria do transdutor.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que uma construção de transdutores capacitivos com geometrias que se adaptem à forma do dedo, ou seja, que maximizem apenas a área efetiva de toque, têm uma maior sensibilidade à interação humana comparativamente às outras geometrias. No entanto, verificar-se-á pelos resultados apresentados nas secções seguintes que existem parâmetros que influenciam de uma forma mais significativa a sensibilidade do sensor ao toque.

4.2. Tensão de Referência dos Comparadores

Na Figura 38 encontra-se representado o circuito oscilador utilizado pela *Microchip* para a leitura de transdutores capacitivos. Se fixarmos o valor da resistência R e o valor da capacidade do transdutor C_s , é possível ainda variar a frequência de oscilação da onda à saída da *latch SR* mudando as tensões de referência presentes nas entradas positivas dos comparadores. Quanto menor for a diferença entre as duas referências, maior será a frequência de oscilação da onda presente à saída do circuito oscilador e vice-versa. O aumento da frequência de oscilação aumenta a rapidez do sistema. Dessa forma, para o mesmo tempo de amostragem, há um ganho de sensibilidade ao toque porque se obtém um maior número de contagens no *TIMER* (aumento da resolução do sistema) que é alimentado pela onda à saída do oscilador *RC*. A questão reside então no impacto que esta técnica possui, por outras palavras, qual será o ganho, em termos de sensibilidade ao toque, se reduzirmos a diferença entre essas duas tensões de referência.

Para a realização deste teste utilizou-se o transdutor capacitivo correspondente à tecla 0 do teclado numérico (um transdutor com uma geometria quadrada) e utilizou-se o dedo indicador para se efetuar o toque. O *firmware* utilizado foi o fornecido pela *Microchip* e já pré-programado nos PIC16F do conjunto de desenvolvimento.

Como se pode observar na Figura 38, a tensão de referência do comparador C_2 é obtida pela utilização externa de um divisor resistivo, não sendo cómodo estar a dessoldar e a soldar

novos componentes para variação dessa tensão. Assim, a tensão de referência do comparador C_2 está sempre fixa no valor de $\frac{1}{4}V_{DD}$, variando-se apenas a tensão de referência do comparador C_1 por configuração do registo correspondente à definição de CV_{REF} do microcontrolador.

A configuração dessa tensão de referência rege-se pela Equação 21.

Equação 21 Equação que rege o valor de tensão na entrada positiva do comparador C_1

$$CV_{ref} = \frac{V_{DD}}{4} + \frac{VR_{<0:3>}}{32}V_{DD}$$

Onde:

V_{DD} representa a tensão positiva de alimentação do sistema;

$VR_{<0:3>}$ representa o valor dos 4 bits que permitem definir CV_{ref} em 16 níveis diferentes de tensão distintos (pode assumir um valor de 0 a 15).

Com base na fórmula apresentada acima, a tensão de referência na entrada positiva do comparador C_1 pode assumir um valor mínimo de $\frac{V_{DD}}{4}$ e um valor máximo de $\frac{23}{32}V_{DD}$.

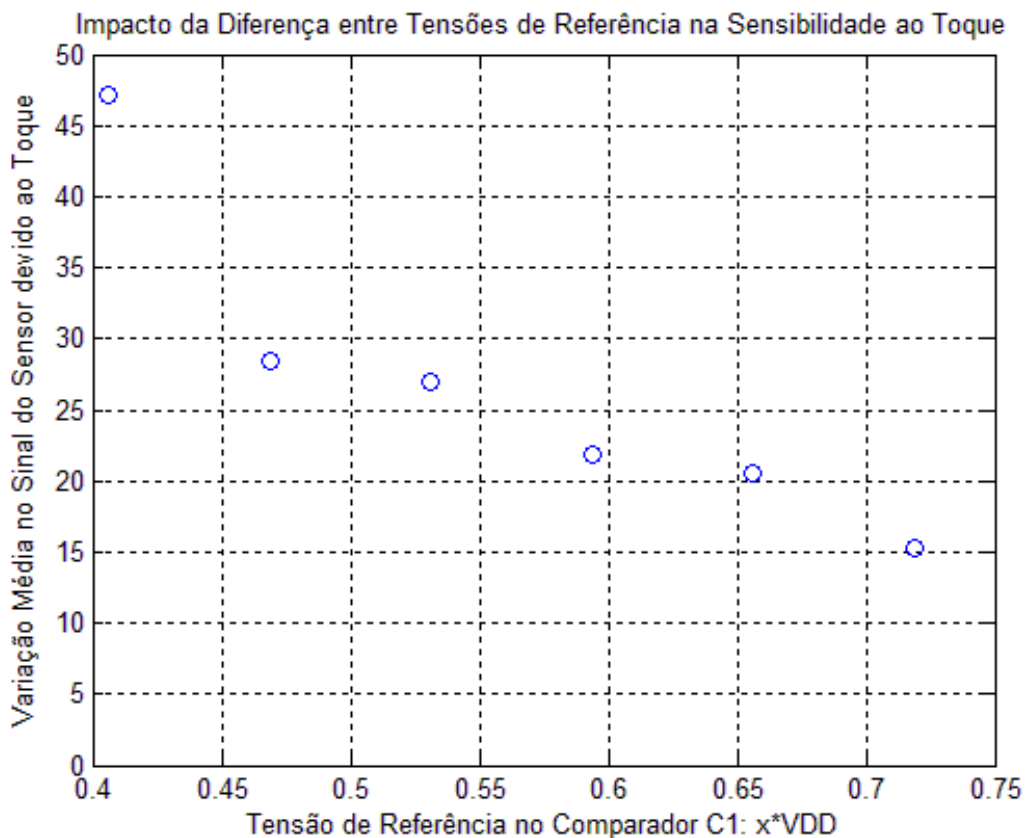


Figura 58 Diferença entre Tensões de Referência versus Sensibilidade ao Toque com Superfície de Toque em Acrílico (1.5mm de espessura)

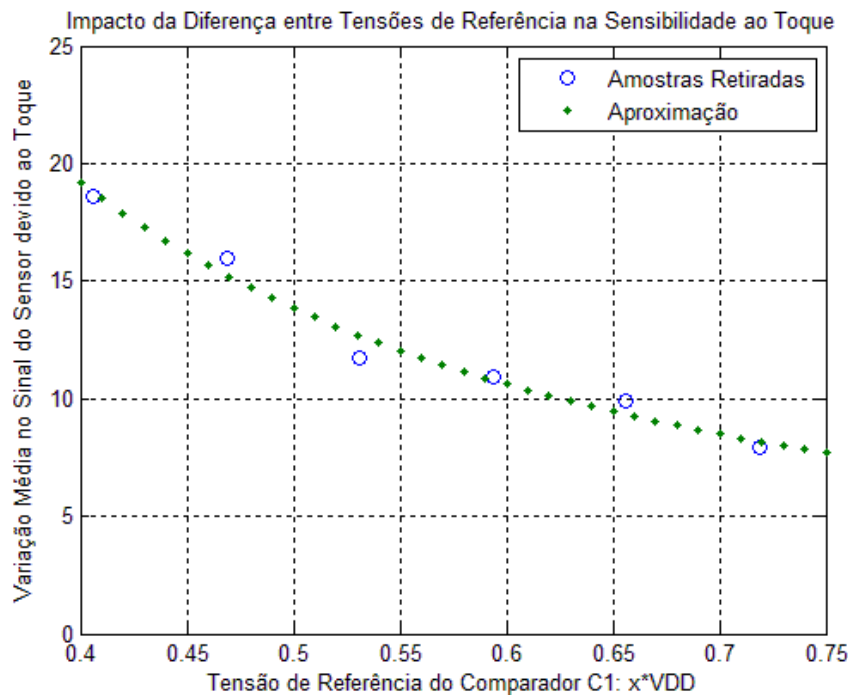


Figura 59 Diferença entre Tensões de Referência versus Sensibilidade ao Toque com Superfície de Toque em Acrílico (3mm de espessura)

Na Figura 58 e na Figura 59 são apresentados dois gráficos com os resultados obtidos com a utilização de uma superfície de toque em acrílico de 1.5 milímetros e de uma superfície de toque em acrílico de 3 milímetros. Em ambos os casos conclui-se que à medida que se aumenta a diferença entre as tensões de referência dos comparadores, há uma degradação na sensibilidade do sistema ao toque. Na Figura 59 encontra-se ainda representada uma aproximação às amostras retiradas, obtida utilizando a ferramenta do *matlab cftool* e definida pela expressão $y = 114 \times e^{-6,44 x} + 17,38 \times e^{-1,25 x}$.

Olhando particularmente para os dois pontos situados nos extremos do eixo das abcissas, nomeadamente, aqueles que representam uma tensão de referência de $\frac{13}{32}V_{DD}$ e $\frac{23}{32}V_{DD}$ no comparador C_1 , a variação do sinal devido ao toque no sensor mais do que duplica na tensão menor comparativamente à tensão maior.

Com esta experiência não foram documentados dados para diferenças de tensão de referência ainda menores porque esses não se mostraram válidos, por outras palavras, o sistema deixa de funcionar corretamente quando a tensão de referência na entrada positiva do comparador C_1 é inferior a $\frac{12}{32}V_{DD}$. É possível que tal ocorra devido a ruídos presentes na tensão de alimentação e devido à existência de imprecisões nas resistências que pertencem ao divisor resistivo que fornece a tensão de referência do comparador C_2 . Estes fatores podem originar situações em que na realidade a tensão de referência em C_2 seja superior a C_1 , inutilizando o sistema.

Resumindo, quanto menor for a diferença entre a tensão de referência do comparador C_1 e a tensão de referência do comparador C_2 maior será a resolução do sinal proveniente do sensor capacitivo. Contudo, essa diferença deve ser suficientemente grande para que os ruídos que existem no sistema não criem anomalias que inviabilizem o seu funcionamento.

4.3. Superfícies de Toque

A Equação 4 indica que a capacidade é diretamente proporcional à constante dielétrica do material (ϵ) e inversamente proporcional à distância (d). Aplicando esta informação a um sensor capacitivo: quanto menor for a espessura da superfície de toque e/ou maior for a constante dielétrica do material de que ela é composta, maior será a sensibilidade do sistema ao toque. Para a realização de testes, foram utilizados três tipos de superfícies: acrílico com uma espessura de 1.5 milímetros, acrílico com uma espessura de 3 milímetros de espessura e vidro com espessura de 4 milímetros. Com estas superfícies de toque, realizaram-se experiências com o objetivo de demonstrar o impacto real da espessura da superfície de toque e a influência do tipo de material utilizado na detecção do toque. Por último, é feito um teste mais exigente em termos de sensibilidade ao toque, isto é, utiliza-se uma superfície de toque constituída por dois materiais distintos. Ou seja, é composta por duas camadas, onde a camada em contato direto com o transdutor capacitivo é de acrílico e com uma espessura de 3 milímetros e a segunda, onde efetivamente se realiza o toque, é de vidro com 4 milímetros de espessura.

4.3.1. Espessura

Para se estudar o impacto da espessura da superfície de toque utilizaram-se as duas superfícies de toque de acrílico, uma com 1.5 milímetros de espessura e a outra com 3 milímetros de espessura. Utilizou-se o *firmware* fornecido pela *Microchip* e pré-programado no PIC16F para a execução da experiência. O toque na superfície de toque foi efetuado com o dedo indicador. A experiência foi realizada para ambas as formas de transdutores disponíveis no conjunto de desenvolvimento da *Microchip*, ou seja, para um transdutor com forma quadrada e para um transdutor com forma retangular.

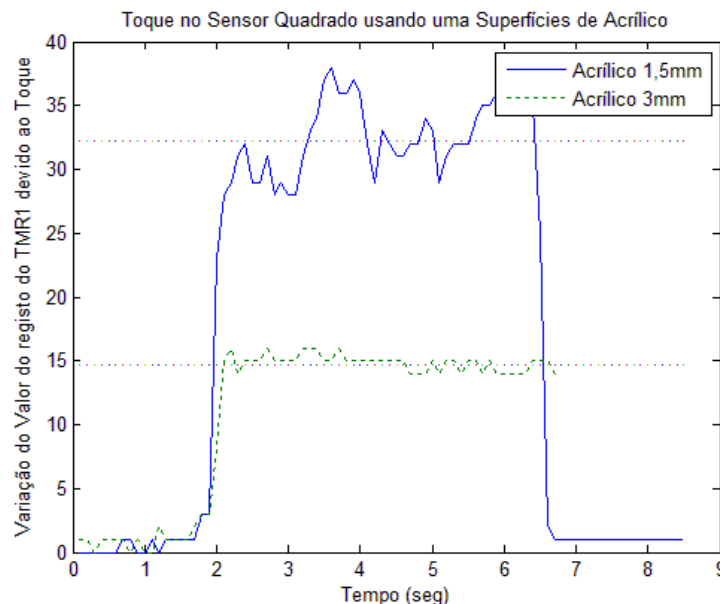


Figura 60 Influência da espessura da superfície de toque na sensibilidade ao toque

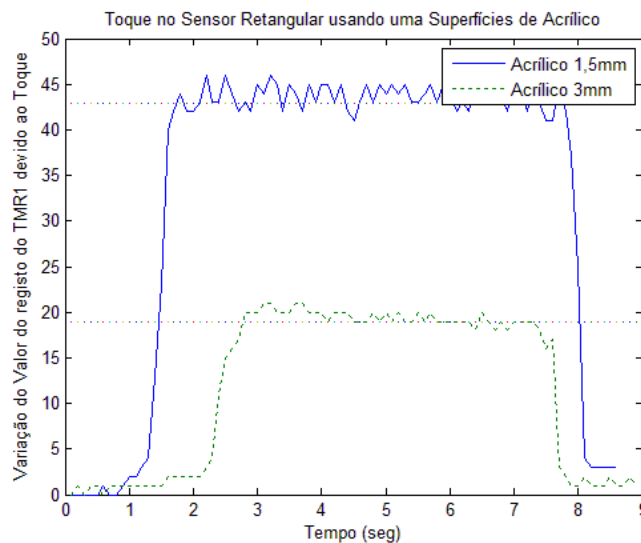


Figura 61 Influência da espessura da superfície de toque na sensibilidade ao toque

Na Figura 60 e na Figura 61 encontram-se representados a resposta do sensor capacitivo ao toque para superfícies de toque com espessuras diferentes. Estes resultados comprovam o que foi dito nos capítulos anteriores sobre a espessura da superfície de toque, ou seja, quanto menor for a espessura desta, maior será a sensibilidade do sistema ao toque.

4.3.2. Tipo de Material

O tipo de material de que a superfície de toque é composta é também um fator que influencia a sensibilidade do sistema. Neste teste foi utilizado o *firmware* pré-programado no PIC16F, o toque foi novamente efetuado com o dedo indicador e foram utilizados dois tipos de materiais: acrílico e vidro.

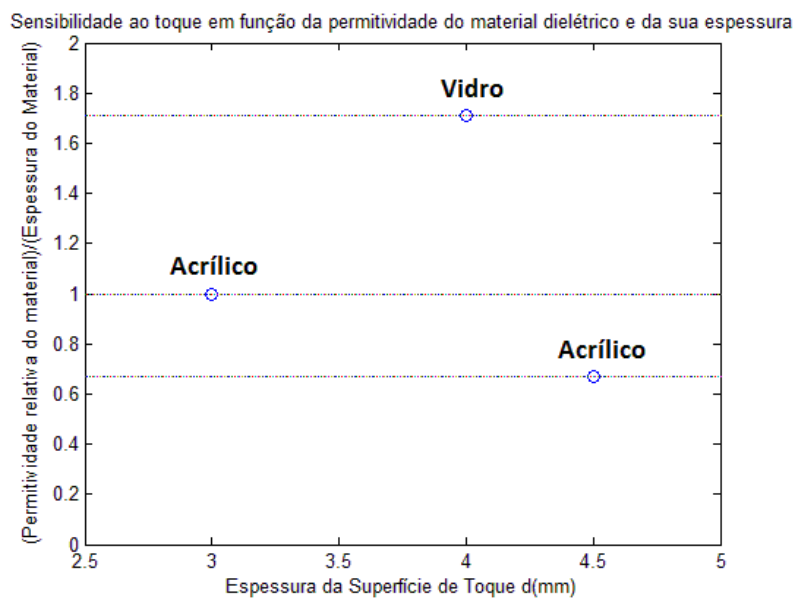


Figura 62 Previsão teórica da influência do toque no sensor em função da permitividade do material dielétrico e da sua espessura

Considerando a Equação 4, como ϵ_0 é uma constante e atendendo a que nesta experiência a área do transdutor se mantém constante, é possível efetuar uma previsão teórica do comportamento esperado do sensor ao toque em função da expressão $\frac{\epsilon_r}{d}$. Porque a permitividade relativa do vidro e do acrílico se encontra compreendida numa gama de valores e não se sabe o valor exato para o material utilizado experimentalmente, considera-se na previsão teórica valores intermédios, ou seja, 6.85 para o caso do vidro e 3 para o acrílico. Como não foi possível realizar a experiência com superfícies de acrílico e de vidro exatamente com a mesma espessura, usou-se as espessuras indicadas na legenda da Figura 63. Calculando a relação, obtém-se a previsão teórica representada na Figura 62, onde se espera uma resposta melhor ao toque por parte do sensor quando se utiliza uma superfície de vidro.

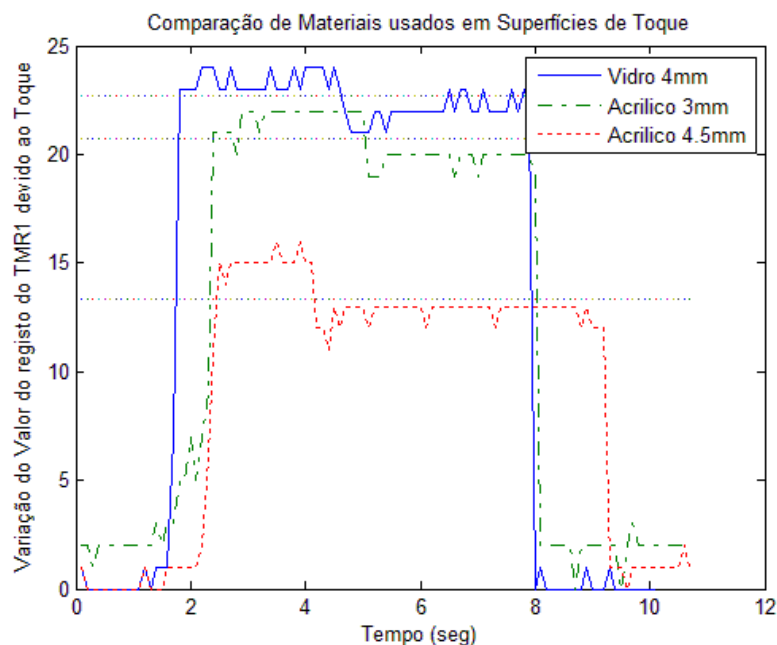


Figura 63 Influência do tipo de material na sensibilidade ao toque

Na Figura 63 verifica-se que a sensibilidade ao toque com uma superfície de vidro com 4 milímetros de espessura é superior à sensibilidade obtida para uma superfície em acrílico com 3 milímetros de espessura. Este resultado comprova o previsto teoricamente, sendo explicado pelo facto de o vidro possuir uma constante dielétrica maior que a do acrílico, tornado o campo elétrico que atravessa o vidro mais forte do que o que atravessa o acrílico.

4.3.3. Teste de Aplicação Final

Conhecer a possibilidade de deteção do toque para superfícies de toque composta por acrílico e vidro com uma espessura total de pelo menos 8 milímetros é um dos interesses da *Exatronic* com a execução deste trabalho de dissertação. De forma a se aproximar deste objetivo, realizou-se uma experiência para uma superfície de toque composta por duas camadas (Figura 64): a primeira camada, em contato com o transdutor, composta por acrílico com 3 milímetros de

espessura e a segunda camada, onde se efetua o toque, composta por uma superfície de vidro com 4 milímetros de espessura. A espessura total usada nesta experiência é de 7 milímetros.



Figura 64 Experiência com Superfície de Toque de Material Misto

Nesta experiência, usou-se um *firmware* que analisa o sensor segundo uma base percentual (3.1.2.2), definindo-se um limiar de detecção de 0.35%. Isto é, se o sinal proveniente do sensor capacitivo variasse (no sentido esperado para o toque) 0.35% face ao seu valor de referência, o sensor seria definido como “tocado”.

De forma a maximizar a resolução do sinal proveniente dos sensores usou-se a menor tensão de referência para o comparador C_1 possível (ver 4.2).

Verificou-se que o sistema deteta o toque com grande dificuldade, isto é, é necessário efetuar um toque bastante forte (pressionar bastante o dedo contra o vidro) para que o toque seja verdadeiramente detetado. A diminuição da percentagem de detecção para facilitar a detecção do toque é uma solução para este problema. Contudo, não é viável pois há uma probabilidade bastante elevada de ocorrência de falsos toques e uma forte existência de *crosstalk*.

Na Figura 65 pode-se visualizar a variação do sinal proveniente de um sensor capacitivo do teclado numérico do conjunto de desenvolvimento na ocorrência de um toque.

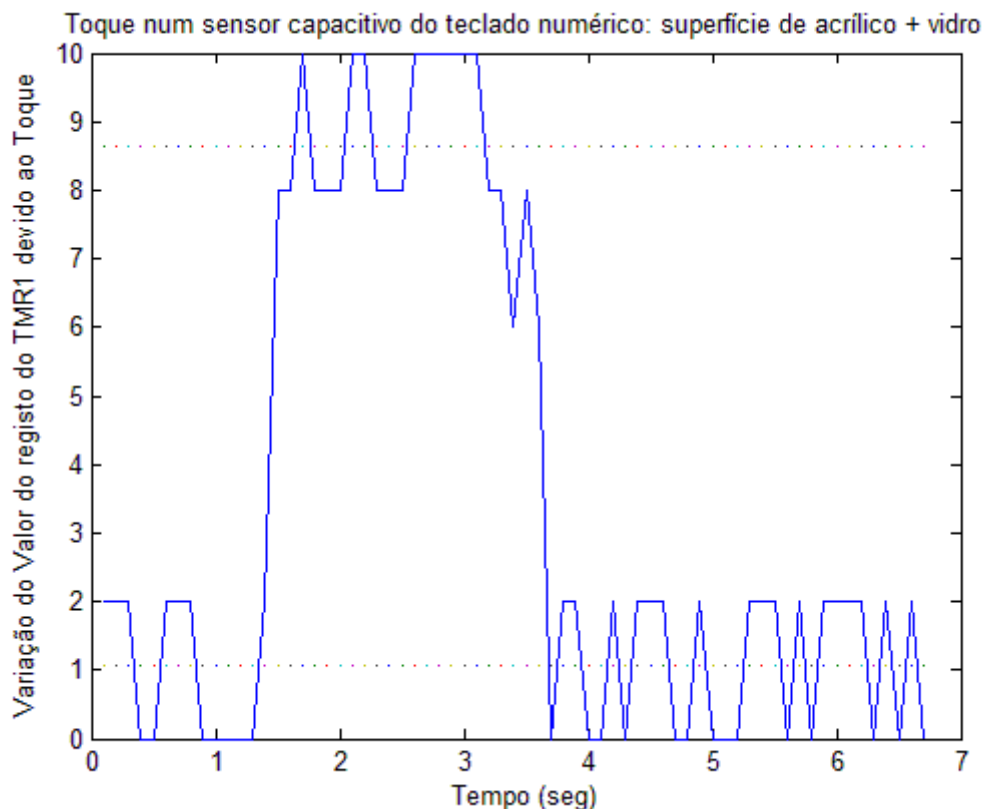


Figura 65 Sensibilidade ao Toque com uma Superfície de 7mm

Como se pode observar, a variação do sinal é muito pequena justificando-se assim a dificuldade em detetar o toque. Calculando a relação sinal-ruído do sistema segundo a Equação 20 chega-se a uma relação de 7.5 que é um valor bom para esta relação segundo os parâmetros da *Microchip*. Embora o valor do SNR cumpra os requisitos, esta solução não fornece ao utilizador uma utilização confortável, uma vez que exige a existência de um toque forte para a sua deteção.

4.4. Resposta a Ambiente Hostis

Os equipamentos eletrónicos vendidos ao consumidor não podem funcionar apenas em ambientes controlados. Têm de ser capazes de funcionarem também em ambientes hostis. Por exemplo, como explicado anteriormente em 2.4.2, a água produz um efeito semelhante ao do dedo num sensor capacitivo. Uma aplicação que tenha de funcionar em ambientes húmidos não pode falhar devido à presença de água.

Uma outra fonte de problemas para os sensores capacitivos encontra-se nas radiações de radiofrequência. No mundo atual, com o desenvolvimento da tecnologia, existem centenas de equipamentos que radiam altas frequências (telemóveis, wi-fi, entre outros). O sistema que possui sensores capacitivos tem de ser suficientemente “forte” para que não sucumba a estes ruídos.

Neste subcapítulo é apresentada a “resposta” dada pelo conjunto de desenvolvimento da *Microchip* a este tipo de “agressões”. É testado a capacidade de deteção do toque quando o teclado capacitivo se encontra humedecido e com uma grande quantidade de água sobre ele e é testado experimentalmente se uma chamada telefónica de um telemóvel colocado sobre o teclado capacitivo produz algum efeito no sinal proveniente do sensor.

4.4.1. Presença de Água

Para se testar a resposta do sistema da *Microchip* à presença de água utilizou-se o *firmware* descrito em 3.1.2.2. Esta versão de *firmware* realiza uma análise percentual ao sensor e apenas permite a detecção simultânea de uma tecla, isto é, define como pressionada a tecla cuja variação do sinal proveniente do sensor é a mais “forte”. Procura-se com esta solução diminuir o efeito de *crosstalk* entre os sensores capacitivos.

Na primeira fase da experiência, humedeceu-se o teclado capacitivo (Figura 66) e efetuou-se toques ao longo do teclado.



Figura 66 Teclado Capacitivo Humedecido

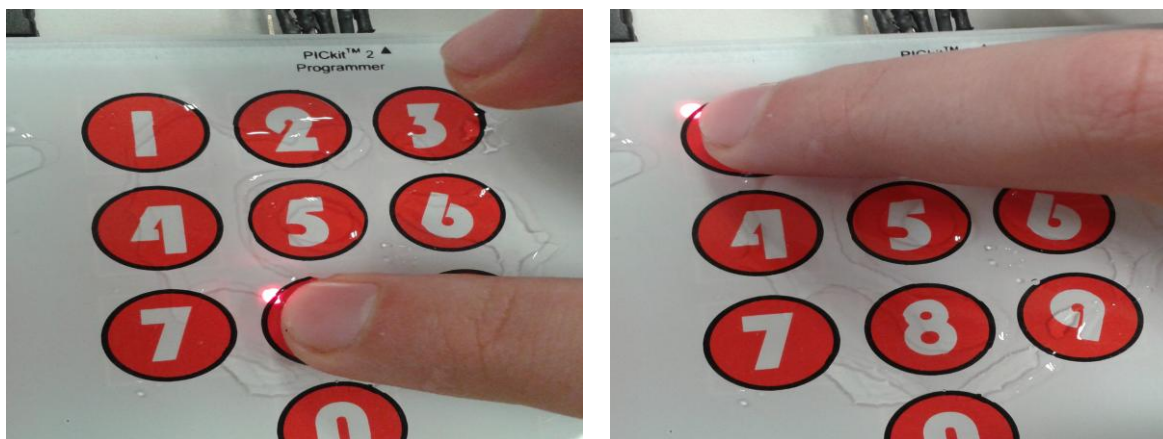


Figura 67 Toque num Teclado Capacitivo Humedecido

Foi possível verificar que com o teclado capacitivo apenas humedecido o toque humano era detetado corretamente, não havendo a ocorrência de falsos toques.

Na segunda fase da experiência, colocou-se uma grande quantidade de água sobre o teclado capacitivo para que se formasse uma “poça” de água sobre este (Figura 68) e utilizou-se o mesmo *firmware* usado na primeira fase para análise dos sensores capacitivos.



Figura 68 Teclado Capacitivo com grande Quantidade de Água sobre ele



Figura 69 Toque num Teclado Capacitivo com Água

Na Figura 69 encontra-se explicito um exemplo da quantidade de água sobre o teclado capacitivo para o qual o sistema deteta um falso toque. Tal acontece porque a água tem uma permissividade elétrica relativa elevada, fazendo com que o toque num dado ponto do teclado capacitivo mude de forma bastante significativa o campo elétrico em todos os pontos cobertos pela água. Quando tocamos num determinado transdutor capacitivo, colocamos uma capacidade em paralelo com a do sensor, contudo, devido à existência da água surgem também capacidades de valor significativo em paralelo com as capacidades dos restantes transdutores que estejam cobertos pela “poça”. Todos esses sensores têm alterações nos seus sinais, podendo mesmo alguns deles ter uma alteração suficiente que os levem a ser definidos como tocados sem que o toque real tenha sido efetuado nesse sensor.

A análise aos sensores com o método do sensor mais pressionado permite limitar a deteção de falsos toques mas, não constitui uma solução válida para situações em que existam quantidades elevadas de água. Será necessária usar outras técnicas (ver 2.4.2) para que o sistema funcione corretamente perante esta adversidade.

4.4.2. Emissores de Radiofrequência

Nesta experiência colocou-se um telemóvel sobre o teclado capacitivo e efetuou-se uma chamada telefónica para outro dispositivo. Usou-se uma superfície de acrílico com 3 milímetros de espessura.

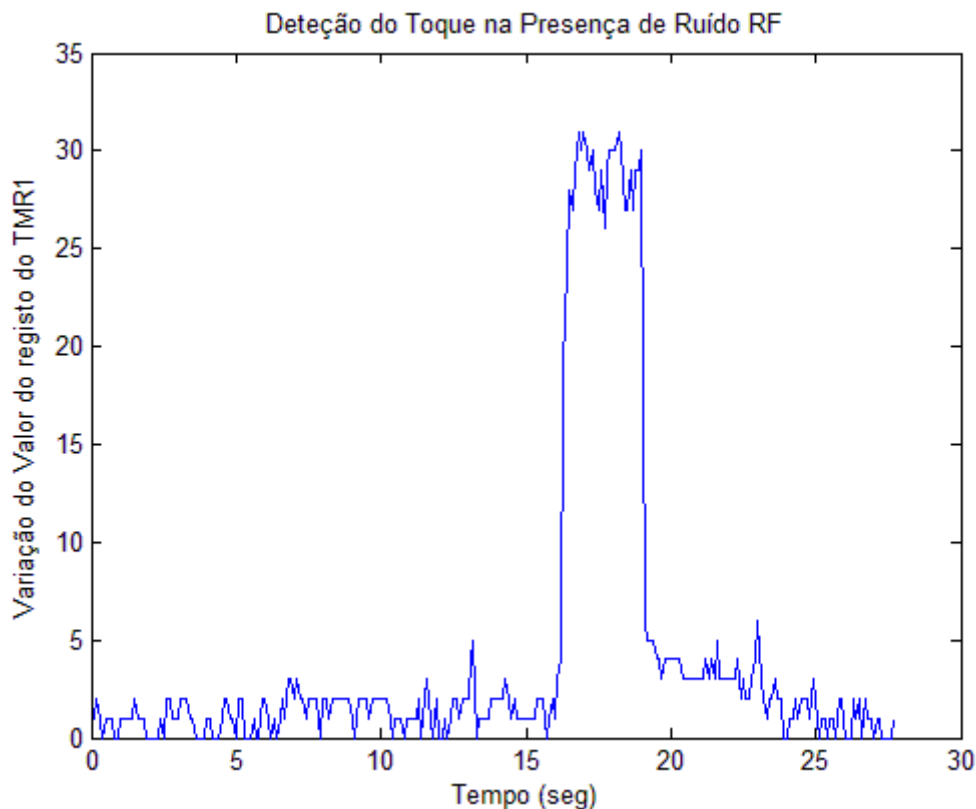


Figura 70 Detecção do Toque na Presença de Ruído de Radiofrequência

A Figura 70 representa a variação do sinal proveniente do sensor correspondente à tecla 0 do teclado capacitivo durante uma chamada telefónica (a chamada é realizada dos 5 aos 27 segundos). Como se pode observar, o sistema não é afetado pela presença desse ruído, sendo capaz de detetar corretamente o toque que ocorre entre os 16 e os 20 segundos. Fazendo uma análise da relação sinal-ruído com as amostras retiradas chega-se a um valor de 21, ou seja, existe uma boa relação sinal-ruído que reforça a ideia de que o sistema é suficientemente imune aos ruídos radiados.

4.5. Conclusão

Com as experiências que se realizaram com o conjunto de desenvolvimento da *Microchip* foi possível confirmar as ideias descritas nos capítulos anteriores relativamente a alguns fatores que influenciam a sensibilidade do sistema ao toque. Verificou-se que a forma do transdutor tem impacto na deteção do toque, chegando-se à conclusão de que as formas que se adaptem à forma do dedo maximizam a sensibilidade do sistema. Verificou-se que a espessura e o tipo de material da superfície de toque desempenham um papel importantíssimo para a resposta ao sistema. Conclui-se também que a água constitui um verdadeiro desafio para o funcionamento correto das aplicações

que usam sensores capacitivos porque provoca um efeito similar ao do dedo no transdutor e porque fortalece o acoplamento entre o dedo e os transdutores adjacentes ao transdutor que efetivamente se quer pressionar.

Por último, verificou-se que o uso de condensadores de desacoplamento para estabilizar as tensões do sistema é uma hipótese, contudo sem prova, para que o sistema funcione mesmo na presença de um forte emissor de ruído RF. Para se obter uma prova seria necessário testar o funcionamento do sistema com e sem condensadores de desacoplamento.

5. Trabalho Experimental e Análise de Resultados: *Atmel*

5.1. QTOUCH Xplained

Neste capítulo são apresentados os resultados de testes efetuados com o conjunto de desenvolvimento da *Atmel* (placa de desenvolvimento *AVR Xplain* e teclado capacitivo *Qtouch Xplained*), cujo método de leitura do sensor se baseia num processo de transferência de carga entre capacidades, e a sua respetiva análise de resultados.

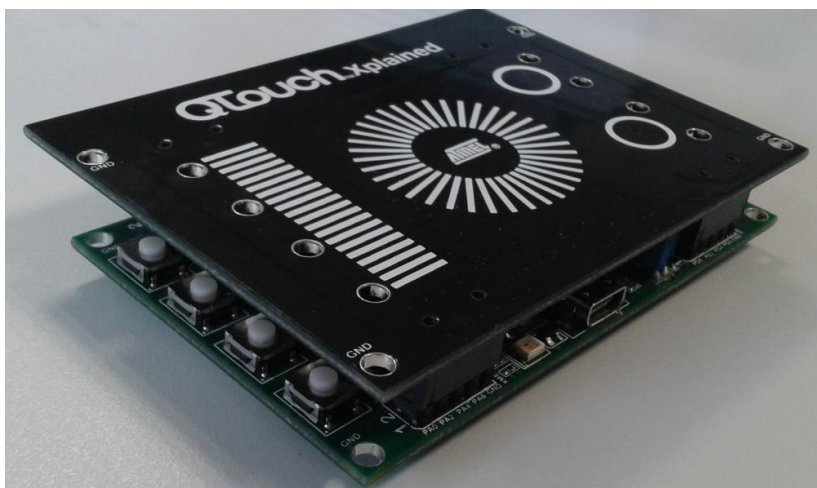


Figura 71 AVR Xplain ligado ao QTouch Xplained

Depois de se ligar o teclado capacitivo *QTouch Xplained* à placa de desenvolvimento *AVR Xplain* constatou-se que os transdutores capacitivos não ficavam diretamente acessíveis ao utilizador, isto é, não era possível realizar um toque direto nos transdutores capacitivos uma vez que estes se encontram na camada inferior do PCB. Por outras palavras, no teclado capacitivo *QTouch Xplained* os transdutores capacitivos encontram-se na camada virada para a placa de desenvolvimento *AVR Xplain*, sendo a camada oposta a disponível para o toque do utilizador. Esse facto constitui então um fator adverso para a sensibilidade do sistema ao toque porque logo à partida tem de se considerar uma superfície de PCB, feita de FR-4 (ver Tabela 1 para mais informações sobre as propriedades dielétricas dos materiais) e com uma espessura de 1.4 milímetros.

Posto este facto, realizaram-se testes com o objetivo de verificar o impacto na sensibilidade do sistema ao toque por parte do PCB e testou-se a resposta do sistema ao toque acrescentando camadas adicionais à superfície de toque: camadas de acrílico e de vidro.

Os comentários efetuados neste capítulo têm como base a informação apresentada nos capítulos anteriores, a análise aos gráficos gerados pelas amostras lidas dos sensores capacitivos e, quando se achar conveniente, no cálculo da relação sinal-ruído do sistema. Uma análise da relação sinal-ruído fornece informação relativamente à intensidade do sinal proveniente do sensor comparativamente à quantidade de ruído que afeta o sistema. A expressão utilizada neste capítulo para o cálculo desta relação é expressa na Equação 20, a mesma que foi utilizada na análise dos dados do conjunto de desenvolvimento da *Microchip*.

5.1.1. Influência do PCB na Sensibilidade ao Toque

Como explicado na introdução deste capítulo, após a montagem do sistema, verificou-se que os transdutores capacitivos da placa *QTouch Xplained* encontram-se na camada do inferior do PCB. Numa aplicação onde se pretenda aplicar este teclado capacitivo para detecção do toque tem de se considerar logo à partida que existe uma camada de FR4 com 1.4 milímetros de espessura no dimensionamento da espessura da superfície de toque.

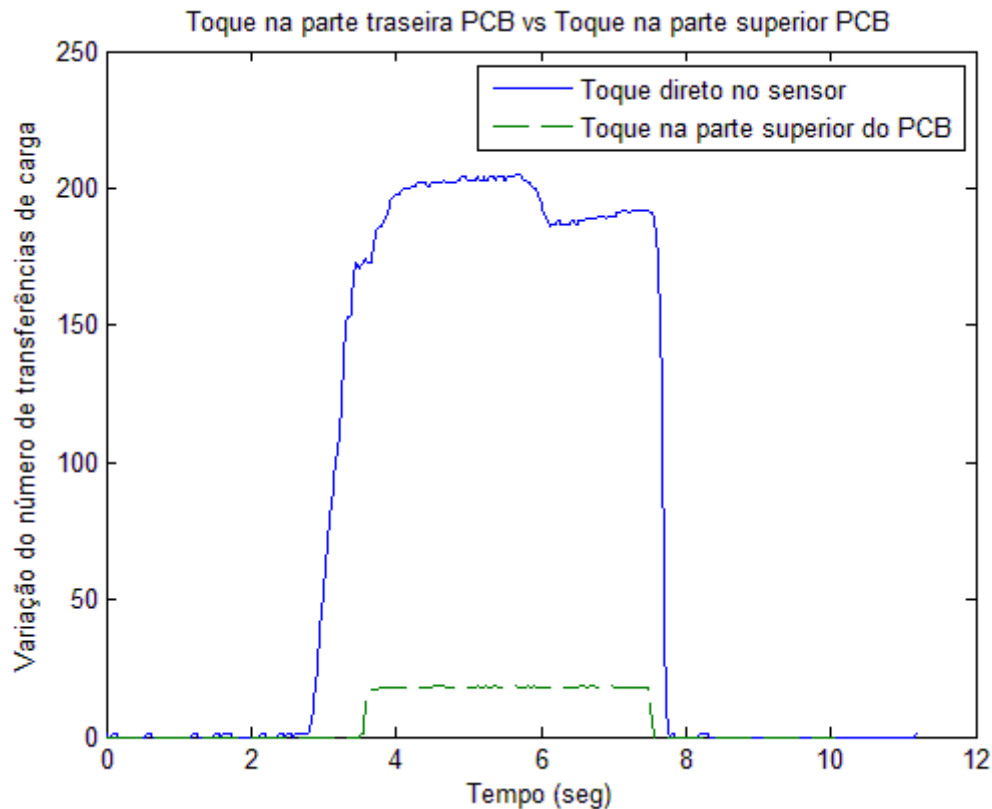


Figura 72 Influência na Sensibilidade ao Toque de uma Camada de PCB (1.4mm de espessura)

A Figura 72 mostra a diferença entre a variação imposta pelo dedo no sinal do sensor quando se toca diretamente um transdutor capacitivo e quando se efetua um toque existindo uma camada de PCB com 1.4 milímetros de espessura. Como se pode observar, há uma quebra significativa na intensidade do sinal. Comparando as médias do valor da variação do número de transferências de carga devido ao toque (aproximadamente 190 para o toque direto no transdutor e 18 para o caso do toque no PCB) verifica-se que há uma perda em cerca de 90%.

Este resultado levanta dúvidas quanto à utilização do teclado *QTouch Xplained* com camadas adicionais na superfície de toque com uma espessura significativa (por exemplo aproximadamente 8 milímetros como pretende a *Exatronic*).

5.1.2. Superfícies de Toque

Aplicando camadas adicionais à superfície de toque do teclado capacitivo *QTouch Xplained*, nomeadamente acrílico com 1.5 milímetros e com 3 milímetros de espessura e vidro com 4 milímetros de espessura, obtiveram-se os resultados apresentados abaixo.

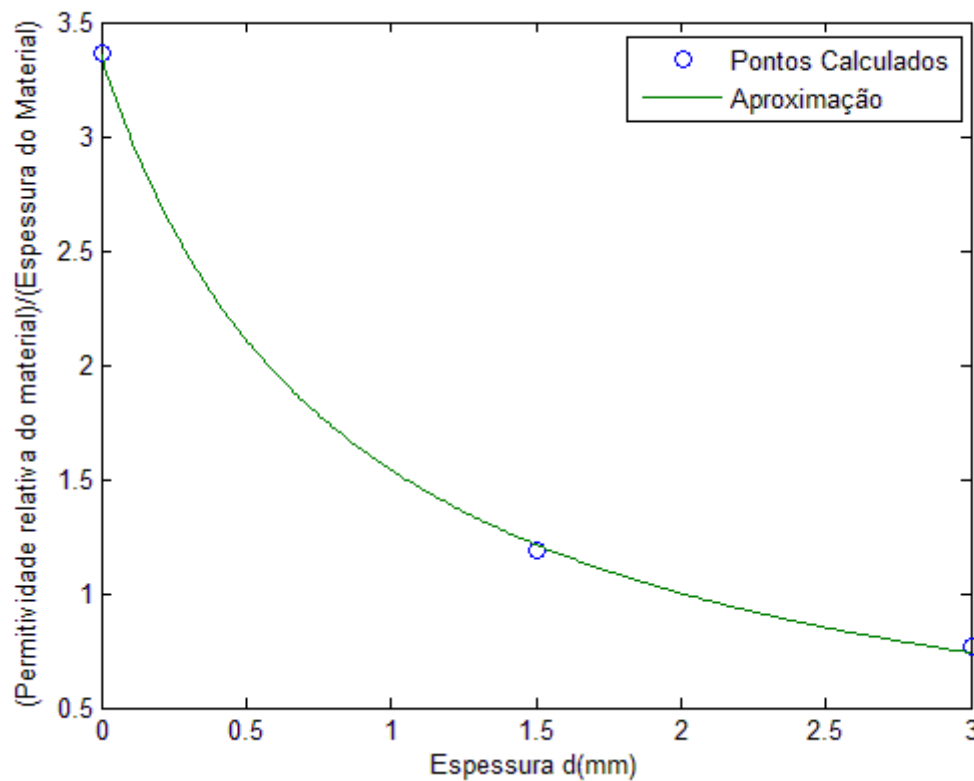


Figura 73 Previsão Teórica da Relação entre a Sensibilidade do Sensor e a Espessura da Superfície de Toque

Considere-se que o sistema Transdutor Capacitivo – FR4 – Superfície de Acrílico – Dedo pode ser visto como duas capacidades em série. A primeira capacidade é calculada em termos relativos por $C_1 = \frac{\epsilon_r FR4}{d_1}$ e a segunda como $C_2 = \frac{\epsilon_r Acrilico}{d_2}$. Considerando as espessuras referidas acima e o valor médio para a permitividade relativa dos materiais utilizados (ver Tabela 1), calculou-se valores relativos para as capacidades equivalentes e traçou-se o gráfico representado na Figura 73. A espessura referida no gráfico refere-se apenas à espessura do acrílico, sendo 0 o ponto de junção entre o FR4 e o acrílico. A aproximação representada na figura foi obtida utilizando a ferramenta *cftool* do *Matlab*, sendo definida por $y = \frac{2,85}{0,85+x}$.

Na Figura 74 observa-se a variação do sinal proveniente de um sensor capacitivo pela existência de um toque. Verifica-se que a variação do sinal diminui quando se aumenta a espessura da superfície de toque. Pode-se ainda verificar que a atenuação do sinal é muito maior quando na superfície de toque acrescentamos ao FR4 uma camada de acrílico de 1.5 milímetros de espessura comparativamente à situação em que acrescentamos ao FR4 e à camada de acrílico de 1.5 milímetros mais uma camada de acrílico com espessura de 1.5 milímetros. Esta observação está de acordo com o previsto com a Figura 73, ou seja, que a relação entre a variação da capacidade do sensor devido ao toque em função da espessura da superfície de toque tem uma relação exponencial.

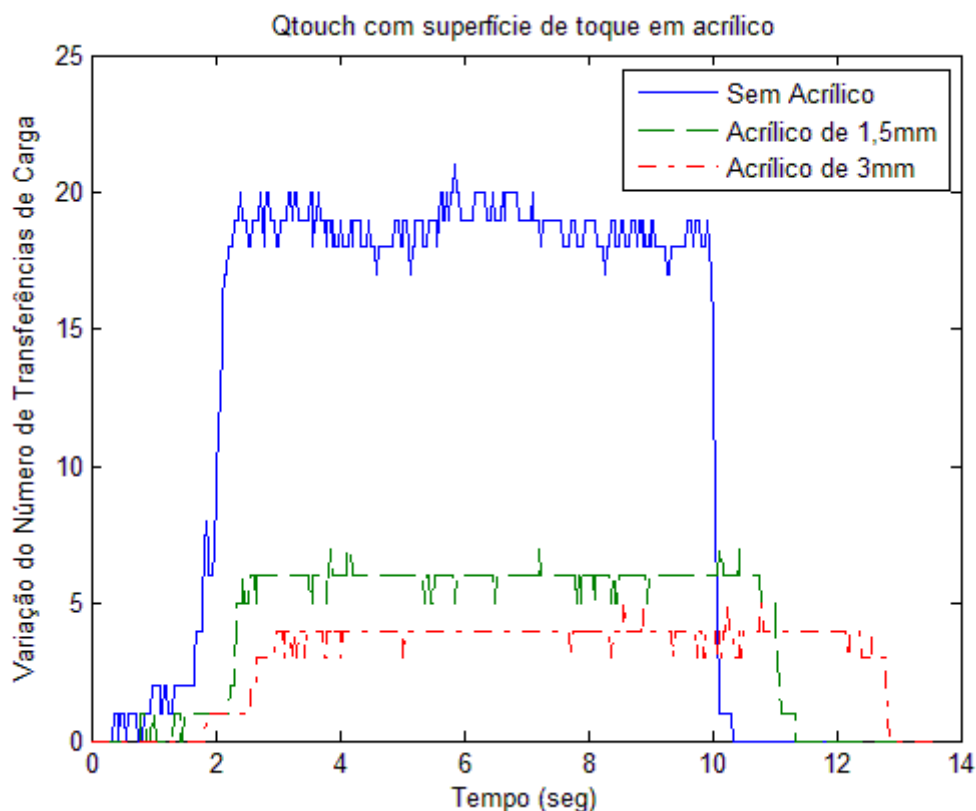


Figura 74 Sensibilidade ao Toque do teclado *QTouch Xplained* para várias Espessuras de Superfícies de Toque

Considerando ainda os dados representados na Figura 74, calculou-se a relação sinal-ruído considerando como limiar de detecção do toque nos três casos o valor 3, obtendo-se os seguintes resultados: quando não se utiliza qualquer superfície de toque adicional (apenas FR4), o sistema apresenta uma relação sinal-ruído de aproximadamente 22. Quando se usa uma superfície de toque adicional em acrílico com 1.5 milímetros de espessura o SNR reduz-se para 10. Se a superfície de toque adicional tiver 3 milímetros de espessura o SNR reduz-se para 7. Se utilizarmos as mesmas condições que foram usadas na análise de resultados do conjunto de desenvolvimento da *Microchip*, verifica-se que em qualquer dos casos se cumpre os requisitos mínimos em termos de SNR contudo o conforto de utilização da aplicação para o utilizador vai-se degradando, sendo necessário efetuar toques cada vez mais fortes com o aumento da espessura para que o toque seja detetado. Além disso, o facto da intensidade do sinal ser muito pequena poderá levar a que picos no sinal ou leituras erradas possam ter influência suficiente que levem à detecção de falsos toques. Podemos concluir que não é recomendado o uso de superfícies de toque adicionais com o teclado capacitivo *QTouch Xplained*.

A Figura 75 mostra a sensibilidade do teclado ao toque quando se utiliza uma superfície de toque adicional de vidro com 4 milímetros de espessura. Mais uma vez se pode constatar que a variação do sinal por influência do toque é muito pequena.

Calculando a relação sinal-ruído também para este caso chega-se a um valor de 13.8. Mais uma vez se obtém um resultado que satisfaz os requisitos mínimos para uma relação sinal-ruído

mas o conforto da aplicação para o utilizador é muito baixo. Este toque só é detetado pressionando o dedo com “força” no vidro.

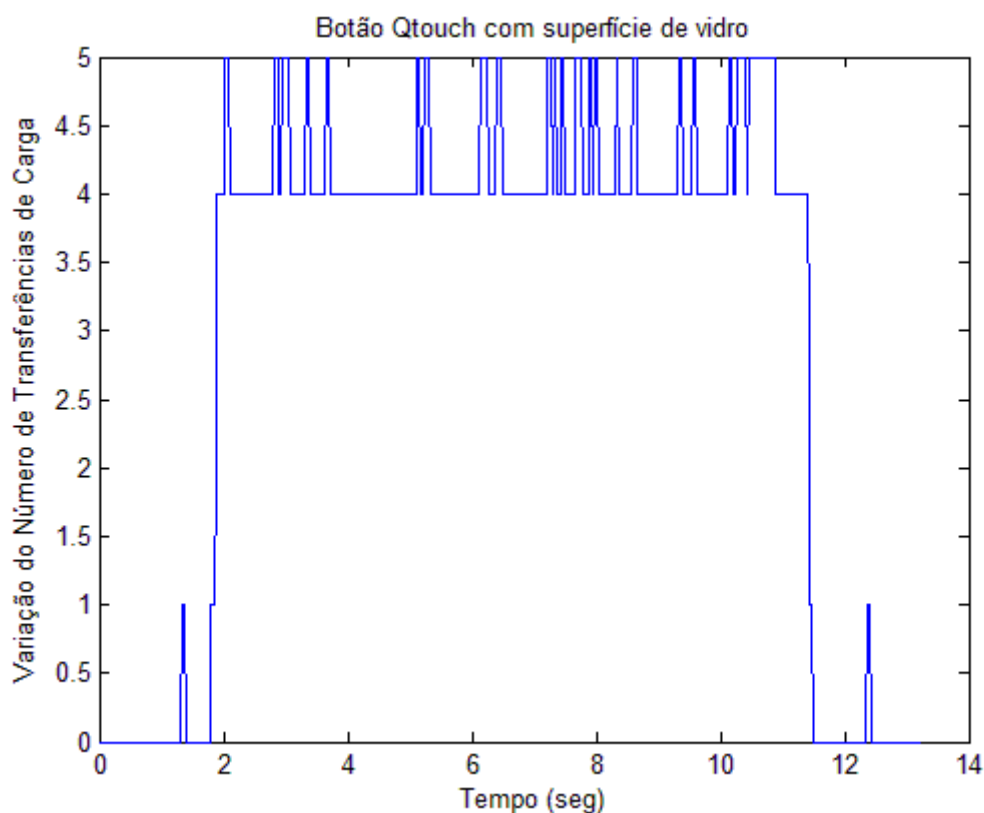


Figura 75 Sensibilidade ao Toque do *QTouch Xplained* com uma Superfície de Toque de Vidro (4mm de espessura)

5.1.3. Conclusão

Tendo como base os resultados obtidos e analisados anteriormente, o uso do teclado capacitivo *QTouch Xplained* com superfícies de toque adicionais não é viável.

Após uma discussão dos dados aqui descritos com o Engenheiro Manuel Loureiro, chegou-se à conclusão que seria necessário produzir-se novos teclados capacitivos. O objetivo destes novos teclados capacitivos seria aumentar a sensibilidade da tecnologia *QTouch* da *Atmel* ao toque para estudar a possibilidade de construir um teclado capacitivo que seja capaz de detetar o toque usando superfícies de toque com pelo menos 8 milímetros de espessura.

5.2. Outro Teclados Capacitivos

Concluindo-se que o teclado capacitivo *QTouch Xplained* não é uma solução viável para as intenções da *Exatronic*, procedeu-se à produção de novos teclados capacitivos com o objetivo de encontrar uma solução que permita a deteção do toque para uma superfície de toque mista, isto é, composta por uma camada de acrílico e outra camada de vidro, com uma espessura total de pelo menos 8 milímetros de espessura. Para se desenhar estes novos teclados recorreu-se ao programa

Altium Designer 10. Juntamente com este programa utilizou-se uma biblioteca disponibilizada pela *Atmel* com diversos tipos de transdutores capacitivos configuráveis.

Apesar da construção de novos teclados capacitivos, manteve-se o uso da placa *AVR Xplain* para leitura e análise dos sinais provenientes dos sensores capacitivos e continuou-se a usar a tecnologia *QTouch* da *Atmel* uma vez que a *Exatronic* pretende utilizar esta tecnologia nas suas aplicações.

Neste capítulo analisa-se a influência da área de um transdutor capacitivo na sensibilidade do sistema ao toque, verifica-se se existe algum impacto do tamanho da ligação do teclado capacitivo ao microcontrolador no desempenho do sistema, verifica-se o impacto dos planos de *terra* e de planos condutores flutuantes junto aos transdutores capacitivos, testa-se a resposta do sistema a diferentes espessuras de superfícies de toque e verifica-se a influência da capacidade do condensador de amostragem na sensibilidade da aplicação ao toque.

Os comentários efetuados têm como base a informação apresentada nos capítulos anteriores, a análise aos gráficos gerados pelas amostras lidas dos sensores capacitivos e, quando se achar conveniente, no cálculo da relação sinal-ruído do sistema.

Com a exceção da experiência realizada em 5.2.4.2, não foi utilizado qualquer filtro de *software* nas amostras retiradas nos testes apresentados neste capítulo.

5.2.1. Área

Como foi referido em 2.2.1, a área de um transdutor capacitivo afeta a sensibilidade do sistema à deteção do toque humano, podendo-se comprovar esse aspeto na Equação 4, onde a capacidade é diretamente proporcional à área. A dúvida reside em saber se o aumento da área tem um impacto sempre crescente na sensibilidade do sistema ou se existe uma área ótima, para qual se atinge um ponto máximo.

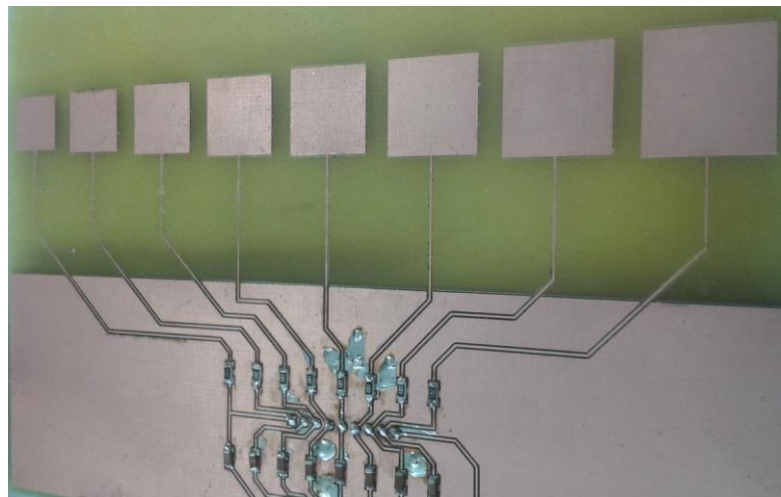


Figura 76 Teclado composto por oito transdutores capacitivos

Para se estudar a influência da área do transdutor na sensibilidade produziu-se o teclado capacitivo da Figura 76. Este teclado é composto por 8 transdutores capacitivos com forma quadrada. As suas dimensões laterais variam de 11 milímetros até 18 milímetros, com um incremento de 1 milímetro.

Sem se usar qualquer superfície de toque, efetuou-se com o dedo indicador um toque direto em todos os transdutores, procurando realizar um toque semelhante em todos os botões.

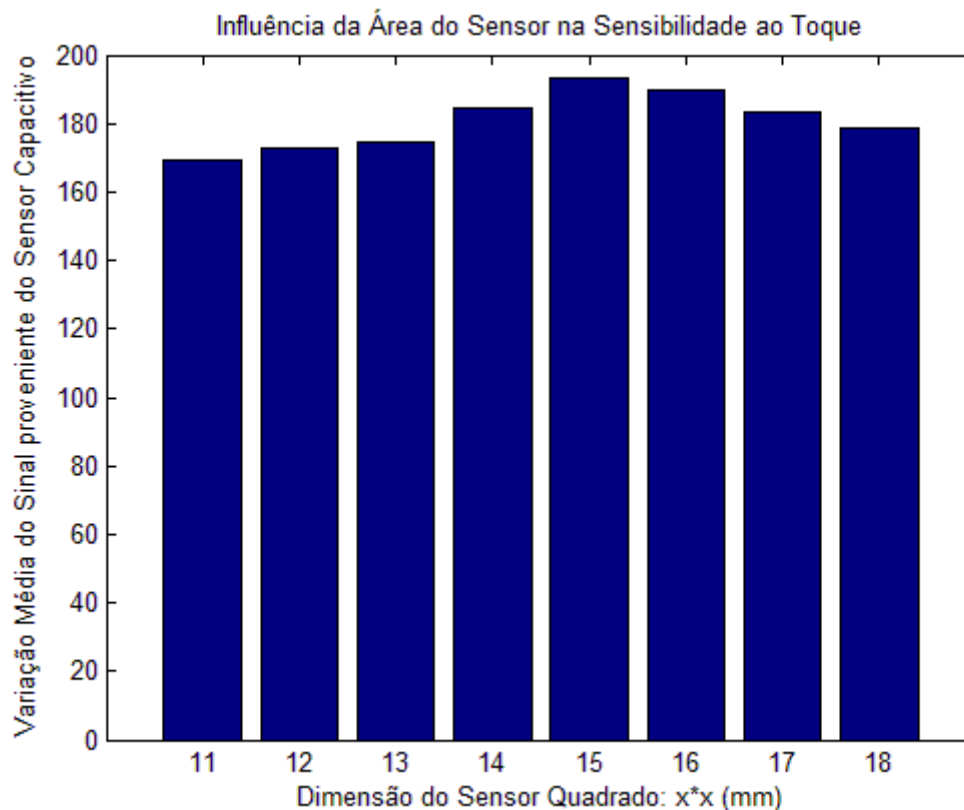


Figura 77 Sensibilidade ao toque em função da área do transdutor

A Figura 77 representa os dados recolhidos dos transdutores capacitivos do teclado da Figura 76. Verifica-se que o sinal mais forte não corresponde ao transdutor capacitivo de maior dimensão. A sensibilidade do sistema vai aumentando com o aumento da área até atingir um ponto máximo, voltando a diminuir a partir desse ponto. Nesta experiência, o transdutor cuja dimensão é de 15 milímetros por 15 milímetros é o que apresenta a maior sensibilidade. A razão para esse acontecimento encontra-se no facto de esse transdutor possuir as dimensões que mais se assemelham às dimensões do dedo indicador do utilizador que efetuou o toque. A partir desse ponto, transdutores capacitivos com áreas superiores não terão qualquer vantagem em termos de sensibilidade porque a área extra apenas contribuirá para a formação de capacidades parasitas que, como já referido em 2.4.1, degradam a resposta do sistema ao toque.

Conclui-se assim que para maximizar a sensibilidade ao toque, a área do transdutor deve ter uma área semelhante à do dedo do utilizador.

5.2.2. Interligação entre Microcontrolador e o Teclado Capacitivo

A capacidade base de um sensor capacitivo vista pelo microcontrolador é composta pela capacidade do transdutor capacitivo, pela capacidade da ligação que liga o microcontrolador ao transdutor e pela capacidade da porta de entrada do microcontrolador a que o transdutor se encontra ligado. A capacidade da porta de entrada do microcontrolador e a capacidade da ligação são parte

constituente da capacidade parasita do sensor capacitivo. Desta forma, é conveniente minimizar o valor destas.

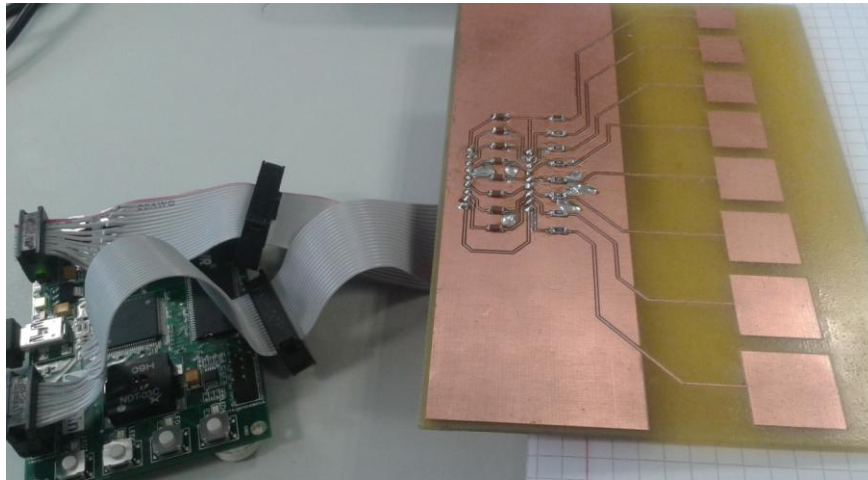


Figura 78 Ligação do Teclado Capacitivo ao Microcontrolador

Como se pode observar na Figura 78, a ligação entre o teclado capacitivo e o microcontrolador é feita por *flat cables*. Realizou-se uma experiência com o objetivo de observar qual o impacto introduzido se o comprimento da ligação variasse 75 milímetros, ou seja, na ligação definida como curta a distância entre o microcontrolador e o condensador de amostragem é de aproximadamente 65 milímetros enquanto que na ligação definida como longa tem uma distância de aproximadamente 140 milímetros.

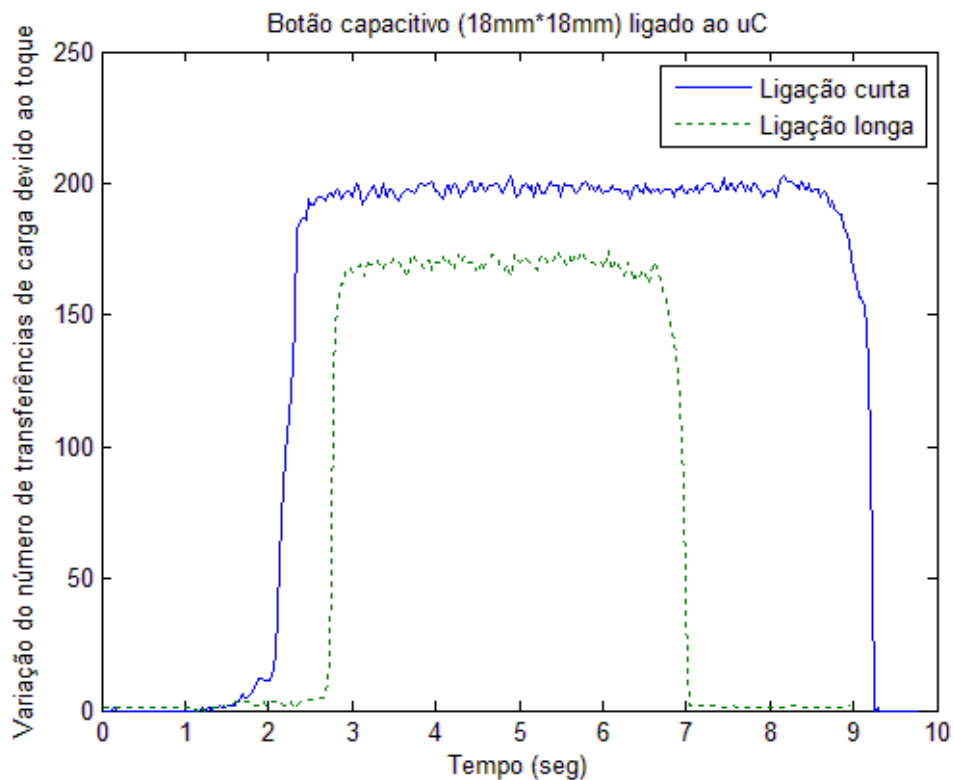


Figura 79 Influência do Comprimento de uma Ligação na Sensibilidade ao Toque

A Figura 79 mostra a variação do sinal proveniente do mesmo sensor capacitivo para duas ligações. Como se pode verificar, a intensidade do sinal na ligação maior é menor comparativamente à ligação menor. É um resultado esperado, porque esta ligação adicional contribui para o aumento da capacidade parasita, degradando a resposta do sistema ao toque.

Usando uma régua capacitiva constituída por 3 transdutores (Figura 80) voltou-se a repetir a experiência anterior.



Figura 80 Régua Capacitiva Espacialmente Interpolado

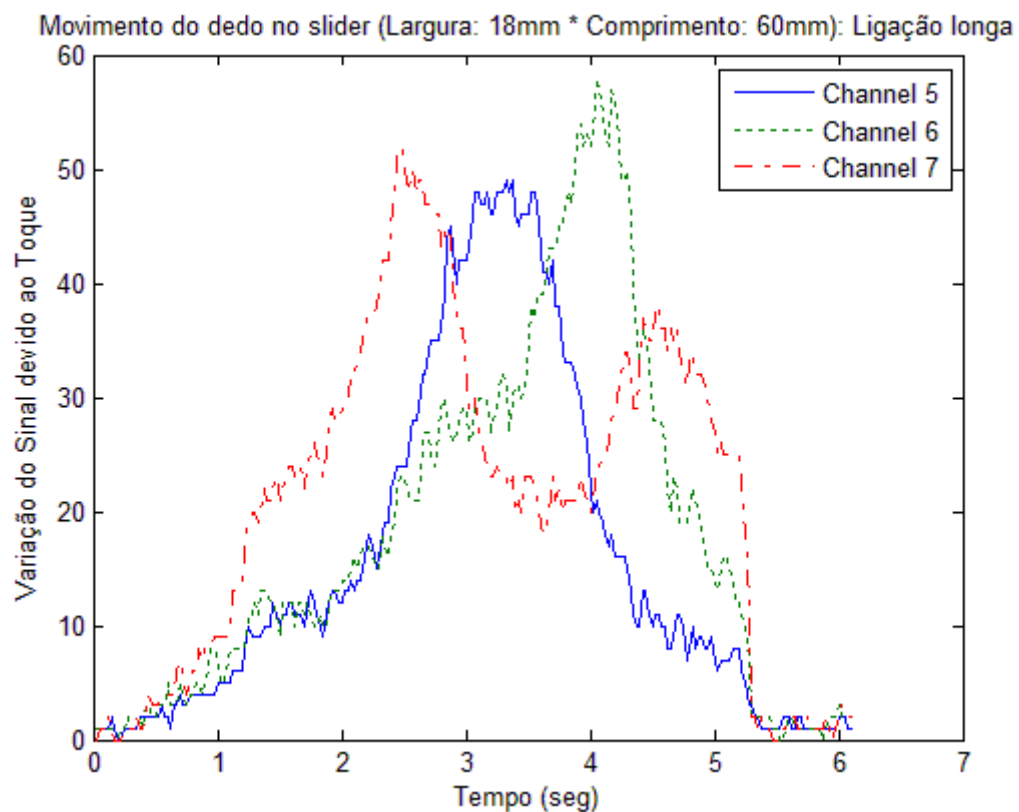


Figura 81 Sinal de uma Régua Capacitiva com uma Ligação Microcontrolador-Transdutor Longa

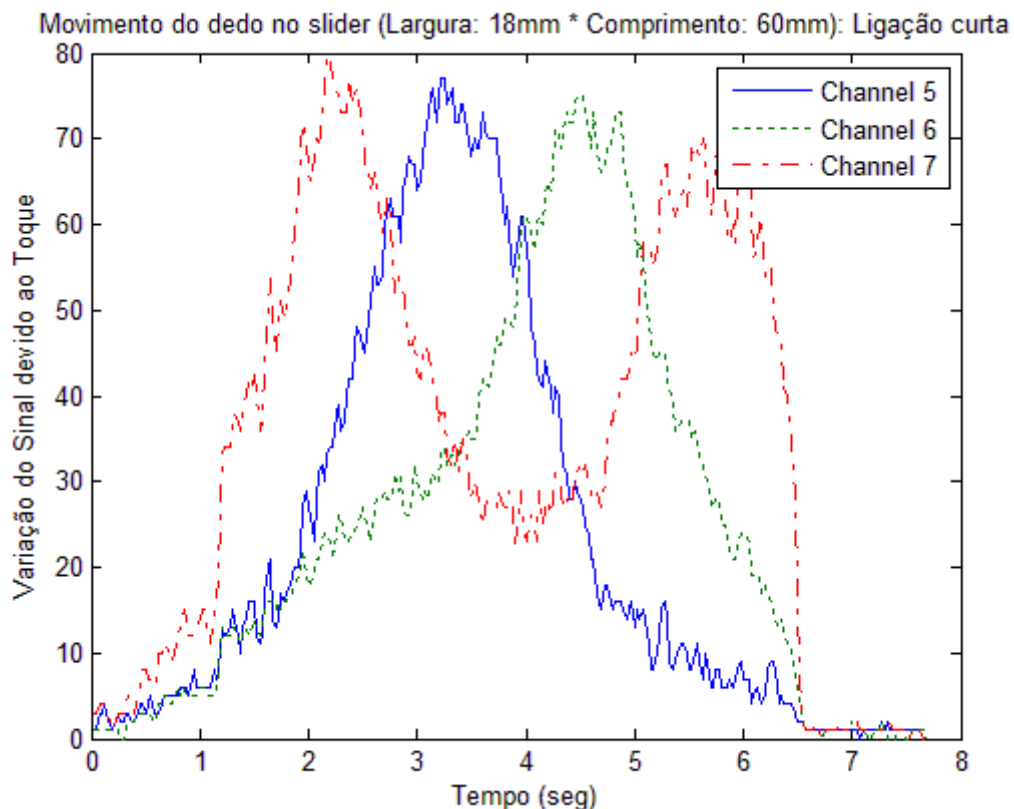


Figura 82 Sinal de uma Régua Capacitiva com uma Ligação Microcontrolador-Transdutor Curta

Comparando os sinais representados na Figura 81 e na Figura 82, obtidos para uma ligação longa e uma ligação curta respetivamente, conclui-se que há uma perda da sensibilidade da régua capacitiva ao movimento do dedo na ligação de maior comprimento.

Relativamente ao ruído que afeta o sistema, não se obteve qualquer alteração significativa. A quantidade de ruído que afeta o sistema é semelhante para as duas ligações. Contudo, é referido em 2.2.6 que quanto maior for a ligação melhor é o acoplamento para a entrada de ruído no sistema. A falta de dados que permitam visualizar essa ideia está relacionada com o facto de a ligação definida neste teste como curta ser na verdade demasiado grande e, assim sendo, é já uma boa entrada para o ruído. Reduzindo a distância entre o microcontrolador e o condensador de amostragem para valores muito menores obter-se-ia melhores resultados relativamente ao ruído que entra no sistema. Se olharmos para os testes realizados com o teclado capacitivo *QTouch Xplained*, onde a interligação com o microcontrolador é muito menor, verifica-se que o ruído que afeta as amostras é muito menor comparativamente ao que atinge as amostras apresentadas neste subcapítulo.

5.2.3. Influência de Planos de *Terra* na Sensibilidade ao Toque

É comum usar-se planos de *terra* para diminuir o impacto do ruído no sistema. Contudo, esses planos produzem um efeito negativo no desempenho de um sistema de deteção capacitiva, por outras palavras, os planos de *terra* aumentam a capacidade parasita do sensor tornando-o menos sensível ao toque.

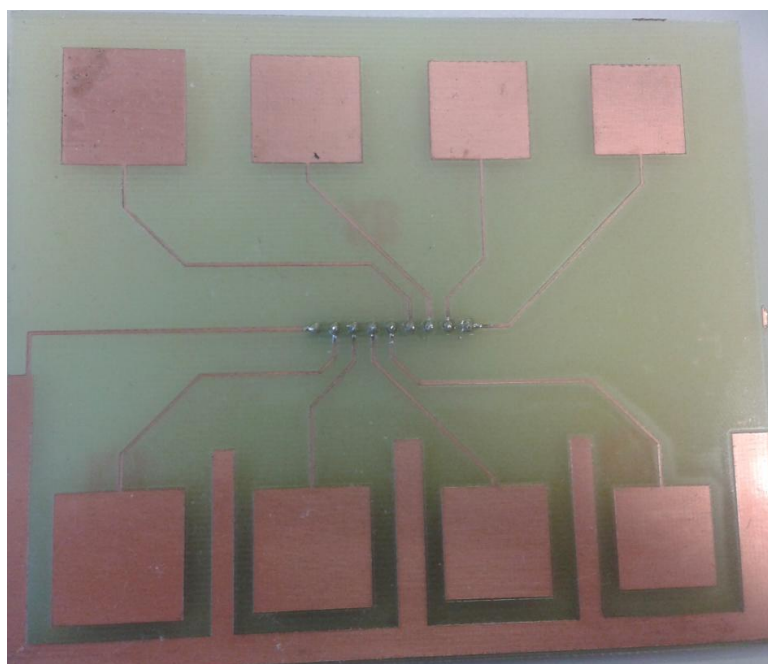


Figura 83 Teclado composto por 8 Transdutores Capacitivos e Plano de Massa

A Figura 83 mostra o teclado capacitivo utilizado no estudo do impacto de plano de “terra” na sensibilidade ao toque por parte de um sensor. O espaçamento entre o transdutor e o plano de “terra” é de 3.4 milímetros.

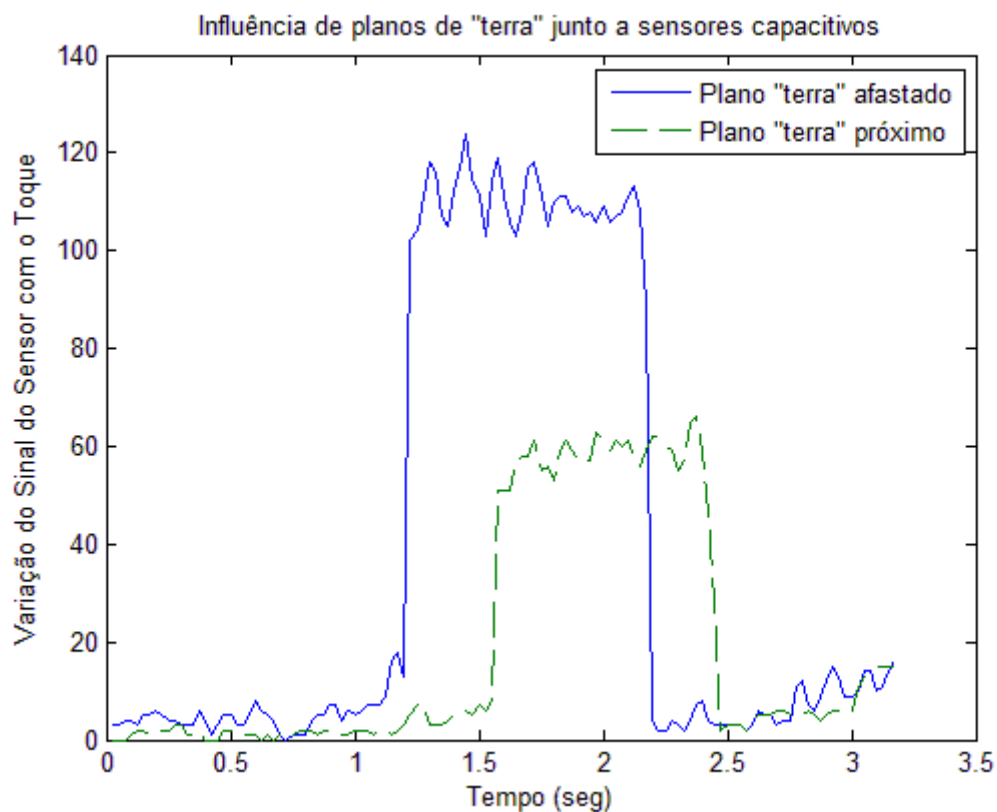


Figura 84 Influência do plano de "terra" na sensibilidade de um sensor (transdutor: 16*16mm)

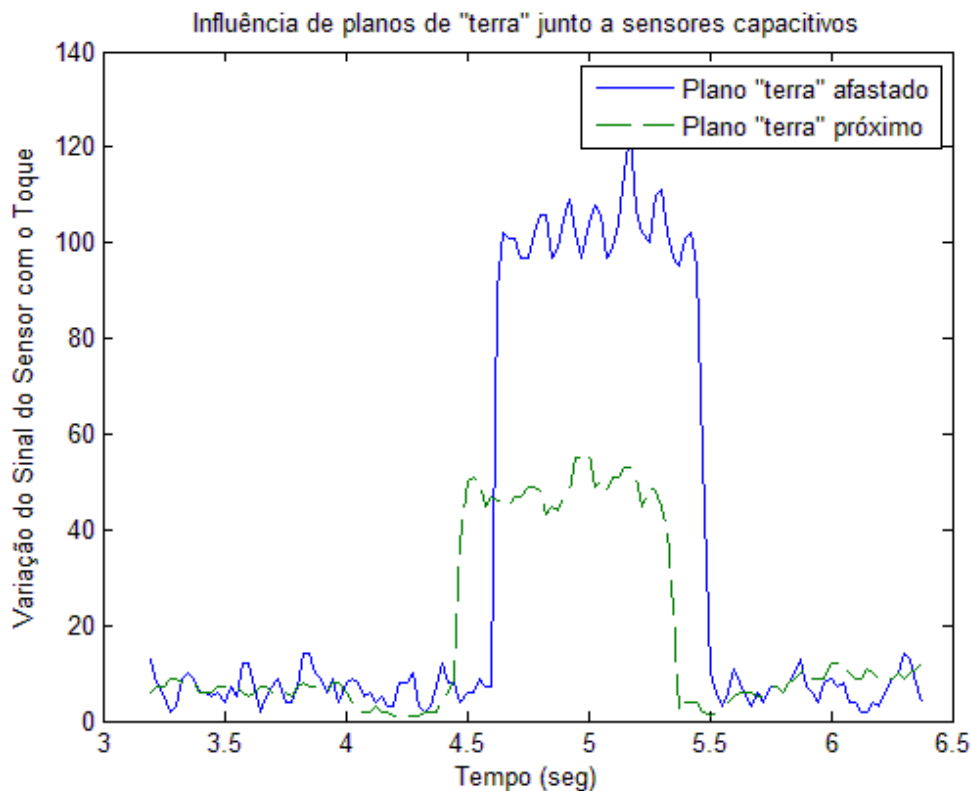


Figura 85 Influência do plano de "terra" na sensibilidade de um sensor (transdutor: 14*14mm)

A Figura 84 e a Figura 85 mostram os resultados obtidos numa experiência realizada para quatro transdutores capacitivos, dois deles com uma dimensão lateral de 16 milímetros e os outros dois com 14 milímetros. Para transdutores com a mesma dimensão, um deles foi colocado junto a um plano de “terra” e o outro transdutor afastado. Como se pode observar nas figuras, há uma clara perda de sensibilidade do sistema ao toque quando o plano de *terra* se encontra próximo do transdutor capacitivo. Devido à presença do plano, a variação no sinal proveniente do sensor capacitivo é sensivelmente metade comparativamente à situação de inexistência de planos de “terra” nas proximidades. Este é então um fator de grande importância na conceção de um sistema.

Deve-se então manter estes planos o mais afastados possível dos sensores capacitivos. Se for mesmo necessário o seu uso, deve optar antes por se utilizar um plano em forma de rede do que totalmente preenchido (Figura 86). Esta técnica reduz a área global do plano e, conseqüentemente reduz o valor da capacidade parasita formada entre o sensor capacitivo e o plano [32].



Figura 86 Planos

5.2.4. Superfícies de Toque

A Equação 4 mostra que a capacidade é diretamente proporcional à constante dielétrica do material (ϵ) e inversamente proporcional à distância (d). Aplicando esta informação a um sensor capacitivo: quanto menor for a espessura da superfície de toque e/ou maior for a constante dielétrica do material de que ela é composta, maior será a sensibilidade do sistema ao toque.

Neste capítulo apresenta-se o resultado de duas experiências: a primeira tem como objetivo verificar o impacto na sensibilidade ao toque de duas superfícies de toque de acrílico com 1.5 milímetros e com 3 milímetros de espessura, na segunda pretende-se verificar se a existência de um plano condutor flutuante na proximidade dos sensores capacitivos produz algum impacto na resposta do sistema ao toque.

5.2.4.1. Espessura

Para se estudar o impacto da espessura da superfície de toque utilizaram-se duas superfícies de toque de acrílico, uma com 1.5 milímetros de espessura e outra com 3 milímetros de espessura. O teste foi realizado para um transdutor capacitivo com forma circular e com 19 milímetros de diâmetro.

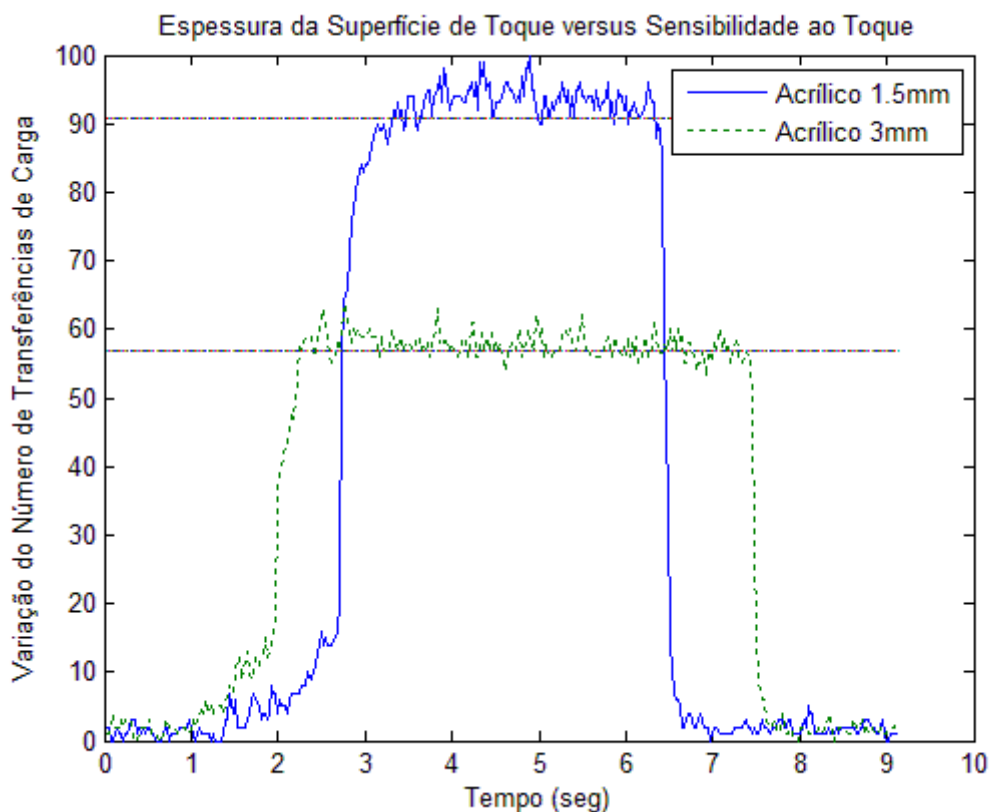


Figura 87 Espessura da Superfície de Toque versus Sensibilidade ao Toque

Como se pode observar na Figura 87, quanto menor for a espessura da superfície de toque maior será a sensibilidade do sistema ao toque. Comparando este resultado com o obtido com o conjunto de desenvolvimento da *Microchip* verifica-se que há uma menor perda de sensibilidade ao toque com o técnica de leitura de sensores capacitivos da *Atmel*. Enquanto no método da *Microchip*

a perda de sensibilidade ao toque entre uma superfície de toque de acrílico com 1.5 milímetros de espessura e uma superfície de toque de acrílico com 3 milímetros de espessura é ligeiramente superior a 50%, no caso do método da *Atmel* a quebra na sensibilidade é inferior a 40%.

5.2.4.2. Planos Condutores Flutuantes

A *Exatronic* pretende utilizar sensores capacitivos incorporados em vidros de forma a construir um sistema que permita o comando de regulação através do toque num vidro. Uma das camadas que constitui o vidro é composta por um material condutor. Uma superfície de toque eletricamente condutora inviabiliza a capacidade de deteção do toque por parte dos sensores capacitivos. É necessário criar no vidro uma zona não condutora onde estes possam ser aplicados. Contudo, continuará a existir planos condutores flutuantes nas proximidades dos transdutores. Realizou-se assim uma experiência para se saber que impacto têm esses planos na sensibilidade do sistema ao toque.

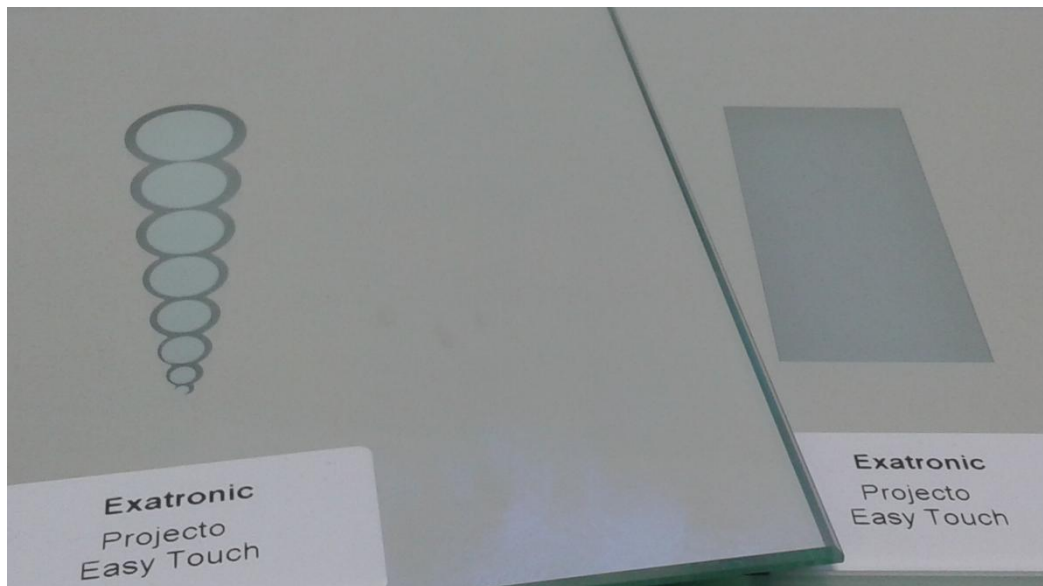


Figura 88 Superfícies de Toque com Planos Condutores Flutuantes

Para isso utilizaram-se os dois vidros representados na Figura 88 e um transdutor capacitivos de forma circular e com 19 milímetros de diâmetro. No vidro da esquerda (formas circulares) o transdutor fica com uma distância do plano condutor de aproximadamente 2.5 milímetros enquanto que no vidro da direita (forma retangular) o transdutor encontra-se distanciado do plano de 10 milímetros (ponto mais próximo).

Neste teste, como se procurou maximizar a resolução do sinal do sensor utilizou-se um condensador de amostragem de 100 nano Farads. Uma vez que o condensador tem uma capacidade relativamente grande o sistema é afetado por uma quantidade significativa de ruído. Assim sendo, as amostras apresentadas na Figura 89, com o objetivo de diminuir a influência do ruído, foram filtradas por um filtro FIR com 32 posições de memória.

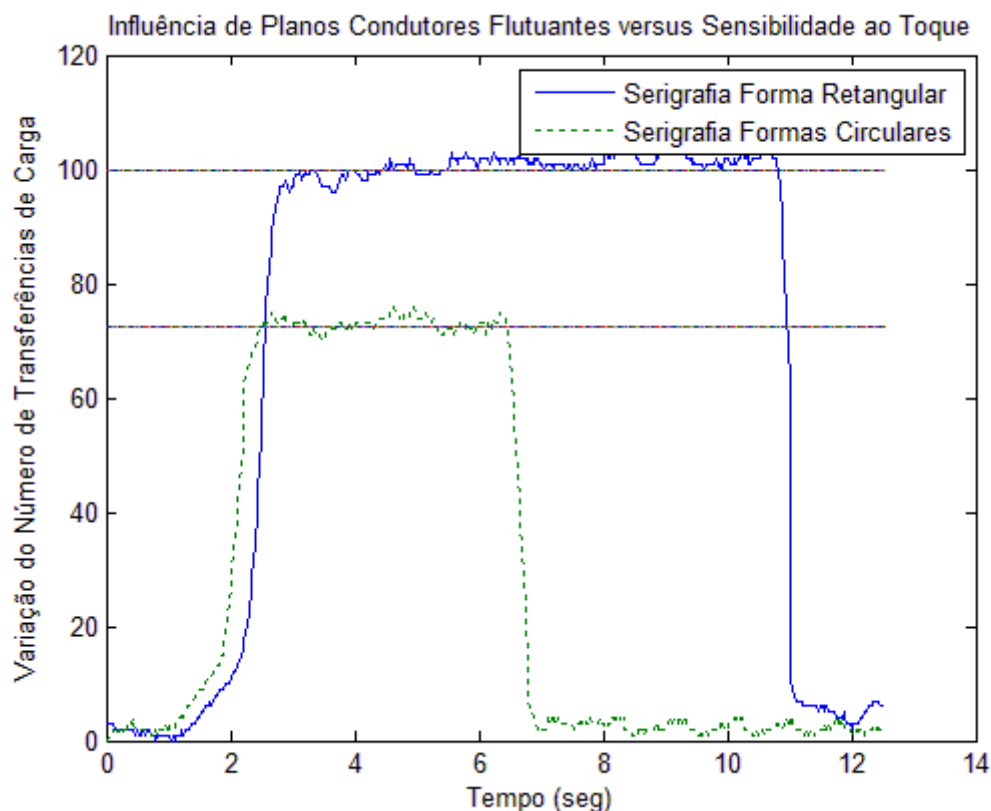


Figura 89 Influência de Planos Condutores Flutuantes versus Sensibilidade ao Toque

Observando a Figura 89 nota-se que a proximidade do plano condutor flutuante do transdutor capacitivo influencia negativamente a sensibilidade do sistema ao toque. Assim, deve-se procurar criar uma zona para o alojamento dos sensores capacitivos onde planos condutores estejam os mais afastados possíveis.

5.2.5. Condensador de Amostragem

A influência do condensador de amostragem na sensibilidade do sistema ao toque é um fator particular da tecnologia *Qtouch* da *Atmel*. O aumento da capacidade do condensador de amostragem aumenta o número de transferências de carga que são necessárias realizar para que a tensão aos seus terminais atinja um determinado valor de referência. O aumento do número de transferências leva ao aumento da resolução do sinal do sensor e, conseqüentemente, ao aumento da sensibilidade ao toque.

Usando um transdutor capacitivo com forma circular e 19 milímetros de diâmetro, procurou-se estudar o impacto na sensibilidade de condensadores de amostragem com três valores de capacidades: 47 nano Farads, 68 nano Farads e 100 nano Farads. Os resultados obtidos estão representados na Figura 90.

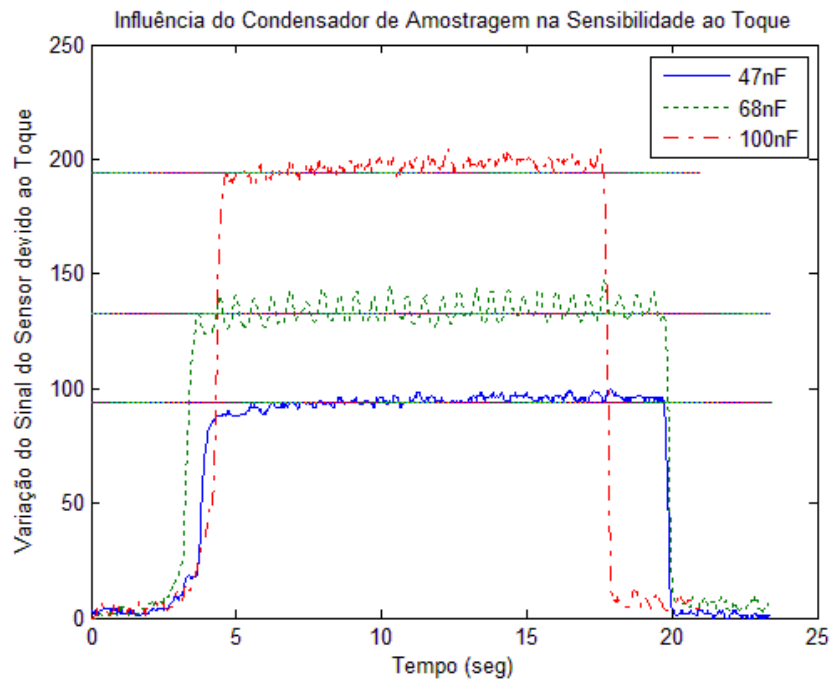


Figura 90 Influência do Condensador de Amostragem na Sensibilidade ao Toque

Como se pode observar, o valor da capacidade do condensador de amostragem tem um forte impacto na sensibilidade ao toque.

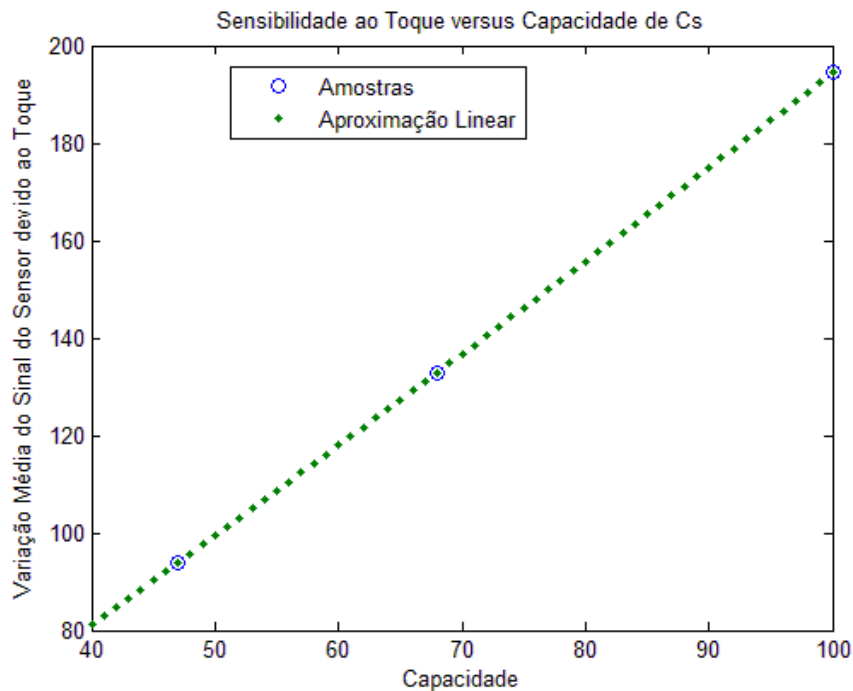


Figura 91 Sensibilidade ao Toque versus Capacidade do Condensador de Amostragem

Se atendermos à variação média do sinal do sensor em função da capacidade verifica-se que existe uma relação aparentemente linear entre estes (Figura 91). Não se pode afirmar que a relação é definitivamente linear apenas com 3 pontos. Seria necessário a utilização de outras

capacidades para a obtenção de mais pontos e se construir um gráfico mais preciso. No entanto, seria preciso a produção de placas adicionais apenas para se traçar esse gráfico, o que não seria verdadeiramente importante para o âmbito deste trabalho de dissertação.

Importa concluir com esta experiência que se houver necessidade de aumentar a sensibilidade da aplicação ao toque, esta pode ser obtida aumentando a capacidade do condensador de amostragem. Contudo, é preciso ter em atenção que o aumento dessa capacidade aumenta também a suscetibilidade do sistema a influências externas como a temperatura, o ruído e a humidade. Utilizando as amostras retiradas para a obtenção da Figura 90 e calculando a variação média do sinal do sensor na ausência de toque, ou seja, apenas por influência do ruído, obtém-se uma variação média de 2.5 para a capacidade de 47nF, de 4.7 para a capacidade de 68nF e de 5.3 para a capacidade de 100nF. Verifica-se assim que à medida que a capacidade do condensador de amostragem aumenta a variação média do sinal devido ao ruído também aumenta.

Outro aspeto a considerar no aumento do condensador de amostragem está relacionado com o tempo de leitura. O aumento da capacidade do condensador leva ao aumento do número de transferências necessárias para que a tensão aos terminais do condensador atinja uma determinada tensão de referência. Sendo necessário mais transferências, o tempo de leitura de um transdutor capacitivo aumenta podendo levar a que o sistema se torne mais lento.

5.2.6. Régua Capacitiva Espacialmente Interpolada e Interpolada por Resistências

A *Atmel* utiliza nas suas régua capacitivas de pequena e média dimensão (comprimento inferior a 60 milímetros) uma construção para a tecnologia *QTouch* baseada em 3 transdutores espacialmente interpolados e recomenda que régua capacitivas de dimensões superiores sejam construídas a partir de um conjunto de transdutores mais pequenos (apenas 3 deles são ligados diretamente ao microcontrolador) interpolados por resistências (Figura 50) com o objetivo de manter a deteção da posição do dedo na régua capacitiva linear.

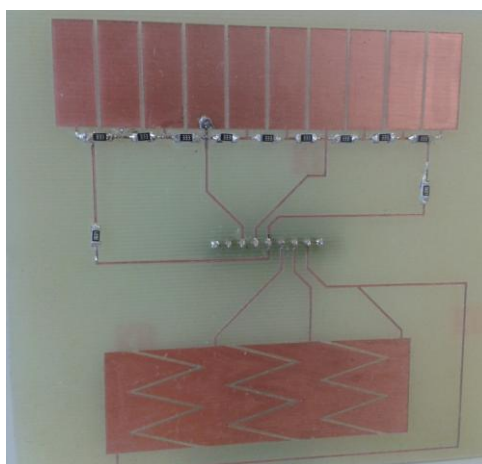


Figura 92 Régua Capacitivas

A dúvida coloca-se em saber se haverá alguma diferença em termos de sensibilidade e ruído entre uma régua capacitiva espacialmente interpolada e uma régua capacitiva interpolada com resistências.

Na Figura 92 mostra-se o PCB com as réguas capacitivas utilizadas para esta experiência. A régua capacitiva especialmente interpolada tem 60 milímetros de comprimento, 20 milímetros de largura e um espaçamento entre transdutores de 0.5 milímetros. A régua capacitiva interpolada por resistências de 33 kilo ohms tem transdutores retangulares com 7 milímetros de comprimento por 18 milímetros de largura. O espaçamento entre transdutores é de 0.5 milímetros.

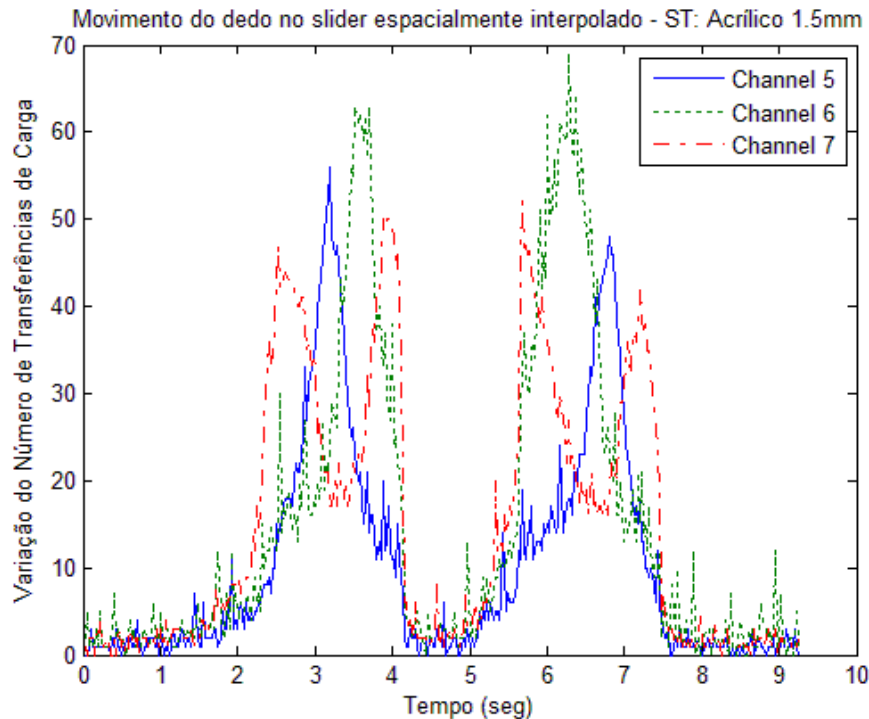


Figura 93 Sinal de uma Régua Capacitiva Espacialmente Interpolado

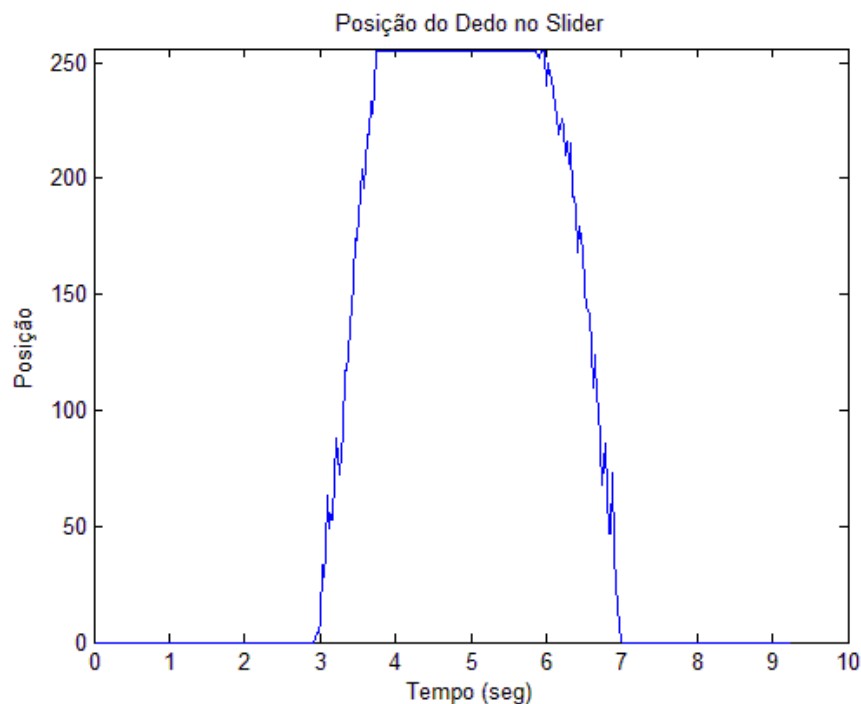


Figura 94 Posição atribuída ao Dedo numa Régua Capacitiva Espacialmente Interpolado

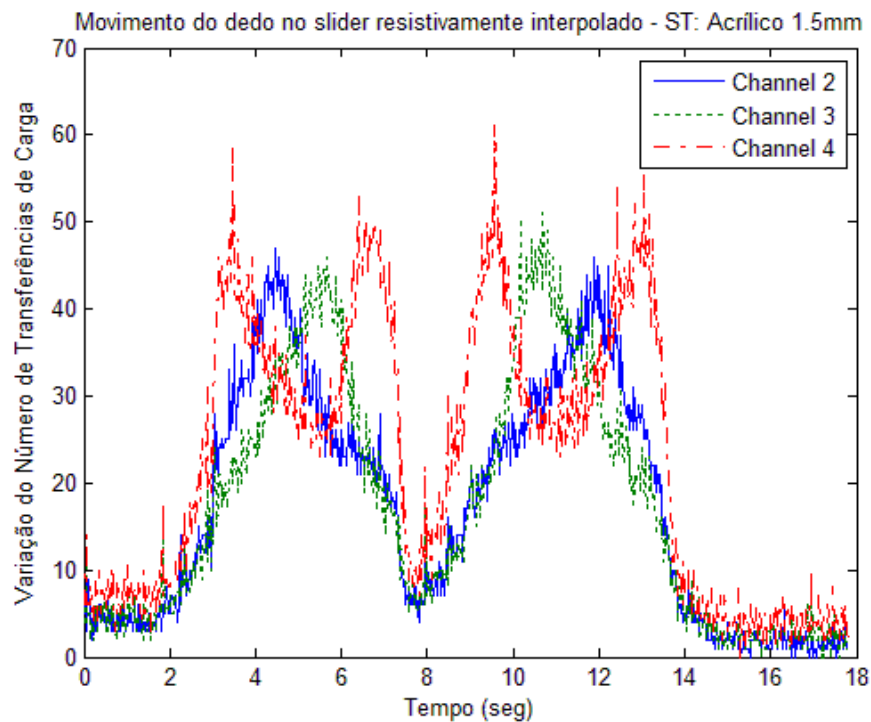


Figura 95 Sinal de uma Régua Capacitiva Interpolada com Resistências

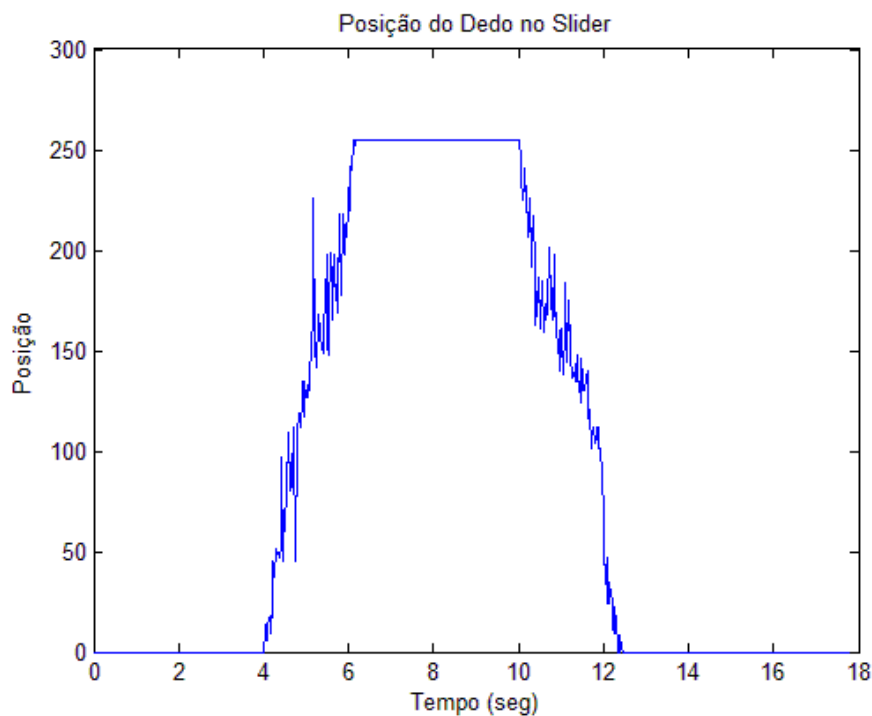


Figura 96 Posição atribuída ao Dedo na Régua Capacitiva Interpolada com Resistências

A Figura 93 e a Figura 95 mostram a variação imposta no sinal dos sensores pelo movimento do dedo nas duas réguas capacitivas utilizando uma superfície de toque de acrílico com 1.5 milímetros de espessura. A Figura 94 e a Figura 96 mostram a posição determinada para o dedo tendo em conta essa variação do sinal. São executados dois movimentos, um no sentido ascendente

e outro no sentido descendente, em cada régua. Como se pode verificar, há uma ligeira queda na sensibilidade ao toque por parte do sensor interpolado com resistências.

Quanto ao ruído médio que afeta o sistema é visível que a régua capacitiva interpolada com resistências sofre um impacto maior. A distinção entre os 3 sinais provenientes dos sensores da mesma régua capacitiva é menor na régua capacitiva interpolada com resistências, isto é, os sinais provenientes dos sensores ao longo do tempo são semelhantes (comparativamente à régua espacialmente interpolada onde a distinção dos sinais é mais clara) dificultando a determinação da posição do toque na régua. Este facto pode ser visualizado na Figura 96, ou seja, nesta figura nota-se que não há uma alteração suave na posição atribuída ao dedo. Vê-se que em alguns pontos a posição atribuída ao dedo entre amostras consecutivas varia significativamente.

Outro aspeto que se notou na régua capacitiva interpolada com resistências é que a variação do sinal é maior quando o dedo se encontra sobre um sensor que está ligado diretamente ao microcontrolador do que quando os sensores estão ligados por resistências. Este facto explica mais uma vez as variações bruscas que podem ocorrer na atribuição da posição do dedo ao longo da régua capacitiva.

Resumindo, pela análise dos dados obtidos, é aconselhável, sempre que o *design* pretendido o permita, o uso de réguas capacitivas espacialmente interpolada já que estas produzem uma resposta melhor ao toque.

5.2.7. Conclusão

Efetuada a análise aos resultados dos testes anteriormente apresentados verificou-se que existem muitos fatores que podem influenciar a sensibilidade de um sensor capacitivo ao toque. A área do transdutor é um dos principais parâmetros: conclui-se que áreas que correspondam à área ocupada pelo toque do utilizador representam um ponto máximo na sensibilidade do sistema. Também a ligação entre o microcontrolador e o transdutor capacitivo deve ser a menor possível para se maximizar a sensibilidade e minimizar a entrada de ruído.

Planos de *terra* e planos condutores flutuantes colocados junto a sensores capacitivos têm um impacto negativo porque aumentam a sua capacidade parasita e como consequência diminuem a sensibilidade ao toque.

Um dos aspetos principais para a calibração de sensores capacitivos que sejam lidos segundo a técnica de leitura *QTouch* da *Atmel* é a capacidade do condensador de amostragem. Verificou-se que quanto maior a capacidade, maior é a sensibilidade do sensor ao toque mas também é maior a intensidade do ruído que atinge o sistema. A escolha da capacidade deve assim procurar um ponto de equilíbrio entre sensibilidade necessária e a quantidade de ruído a que o sistema irá estar sujeito.

Por último, comparam-se dois tipos de réguas capacitivas, uma espacialmente interpolada e outra interpolada com resistências. Conclui-se que a régua capacitiva espacialmente interpolada possuía uma melhor reposta ao toque já que era ligeiramente mais sensível e a intensidade do ruído com que era atingida era menor.

6. Calibração Final de Sensores Capacitivos

Com este trabalho de dissertação pretendeu-se desenvolver um sistema baseado em sensores capacitivos para deteção do toque e do movimento do toque. Tendo como base os resultados apresentados nos capítulos anteriores, o uso de microcontroladores da *Atmel* pela *Exatronic* e o facto de o conjunto de desenvolvimento da *Microchip* conter todos os componentes integrados no mesmo PCB, impossibilitando o uso do PIC16F com outros sensores capacitivos (seria necessário adquirir este microcontrolador em separado), optou-se por se criar um sistema de deteção do toque baseado na tecnologia *QTouch* da *Atmel*.

O sistema final é baseado numa régua capacitiva que será lida pelo microcontrolador ATxmega128A1 da *Atmel* (microcontrolador incluído na placa de desenvolvimento *AVR Xplain*). A régua capacitiva será colocada dentro de um suporte de plástico que irá constituir uma camada da superfície de toque com cerca de 2 milímetros de espessura. Esse suporte será colado então a um vidro com 4 milímetros de espessura. A espessura final da superfície de toque, composta pelo vidro, pela cola e pelo suporte de plástico, deverá estar compreendida entre os 7 e os 8 milímetros de espessura.

6.1. Filtros Digitais

A necessidade de aumentar a sensibilidade ao toque incrementando a capacidade do condensador de amostragem leva inevitavelmente ao aumento da intensidade do ruído que afeta o sistema. Se a relação sinal-ruído for muito baixa, a distinção entre o que é informação útil do sensor e o que é ruído poderá tornar-se um desafio. No entanto, existem técnicas, como as apresentadas em 2.5, que permitem por *software* reduzir o impacto do ruído, facilitando a distinção entre o sinal útil do sensor capacitivo do ruído. Neste subcapítulo compara-se a atenuação ao ruído operada por 3 tipos de filtros, nomeadamente, um filtro FIR, um filtro IIR e uma média de amostras com rejeição de extremos (ordena-se as amostras e realiza-se a média apenas com as amostras centrais, os extremos são excluídos). Na realização do estudo utilizou-se um transdutor capacitivo de forma circular com 19 milímetros de diâmetro e um condensador de amostragem com 100 nano Farads de capacidade. A experiência foi realizada para a ausência de toque e na presença de toque. Cada filtro usa uma memória de 16 amostras.

Tabela 5 Ausência de Toque

| Filtro | Variação Média do Sinal devido a Ruído |
|--------------------------------|---|
| Sem Filtro | 7.2 |
| FIR (média de 16 amostras) | 4.6 |
| Média com rejeição de extremos | 1.7 |
| IIR | 1.5 |

Tabela 6 Presença de Toque

| Filtro | Varição Média do Sinal devido a Ruído |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| Sem Filtro | 23.4 |
| FIR (média de 16 amostras) | 5.2 |
| Média com rejeição de extremos | 1.9 |
| IIR | 1.5 |

Analisando a Tabela 5 e a Tabela 6 verifica-se que o filtro FIR corresponde ao pior filtro e o filtro IIR ao melhor filtro em termos de atenuação do ruído. Relativamente à velocidade da resposta do sistema, o filtro FIR (média de 16 amostras) apresenta melhor resposta comparativamente aos outros dois. A velocidade de resposta para o filtro IIR e para a Média com rejeição de extremos é semelhante, ou seja, ambos tornavam o sistema lento. No entanto, a velocidade de resposta pode ser incrementada aumentando ou a frequência de relógio do sistema ou aumentando a frequência com que são geradas as interrupções para a leitura dos sensores capacitivos. Contudo, o aumento da frequência tem consequências ao nível do consumo energético do sistema (ver 2.4.4). Como, neste estado se pretende apenas colocar o sistema a funcionar sem se preocupar com as questões energéticas, resta decidir se no *firmware* demonstrador de tecnologia se vai utilizar um filtro IIR ou um filtro baseado na média com rejeição de extremos.

O filtro IIR, segundo os dados obtidos, tem uma melhor resposta ao ruído. No entanto, após discutir com o Engenheiro Manuel Loureiro da *Exatronic*, concluiu-se que se no sistema existirem momentaneamente grandes variações no sinal, com um filtro IIR essas variações devido ao ruído vão se propagar no tempo, enquanto que no filtro baseado na média com rejeição de extremos afetam no máximo uma análise do sistema. Desta forma, para o desenvolvimento do *firmware* demonstrador de tecnologia decidiu-se utilizar um filtro digital baseado na média com rejeição de extremos.

6.2. *Firmware* Demonstrador de Tecnologia

O *firmware* apresentado neste capítulo tem como objetivo demonstrar a tecnologia *touch* capacitiva baseada num comando do tipo régua. Este *firmware* demonstrador pretende simular um potenciómetro através da alimentação de uma régua a leds.

O *firmware* tem como entrada do utilizador um comando de régua com tecnologia capacitiva e fornece duas saídas: uma saída analógica entre 0 (todos os leds da régua apagados) e 100 (todos os leds da régua acesos) e uma saída digital (sistema adormecido ou sistema ativo).

O valor da saída analógica é controlado pela régua capacitiva, isto é, deslocar o dedo na régua capacitiva no sentido positivo aumenta o valor da saída (número de leds acesos), deslocar no sentido oposto diminui o valor. Existe um parâmetro interno que permite regular a sensibilidade da régua (valor do incremento em função da distância percorrida) e outro que permite definir a velocidade máxima (valor máximo de incremento).

O valor da saída digital é calculado devido a um toque curto na régua capacitiva e permite alternar o sistema entre dois modos de funcionamento: o modo adormecido (desliga a régua de leds) e o modo ativo (liga a régua de leds). Quando o sistema passa do modo adormecido para o modo ativo recupera o valor da saída analógica que possuía antes de entrar no modo adormecido.

O diagrama de blocos que descreve este *firmware* encontra-se representado na Figura 97. O algoritmo começa por realizar as configurações necessárias no sistema, nomeadamente a definição dos ports (pins), a frequência de relógio interna de operação, entre outros. De seguida, ativam-se os canais do microcontrolador que são utilizados pelos sensores da régua capacitiva e ativa-se a capacidade de leitura de leitura dos sensores dos canais anteriormente habilitados.

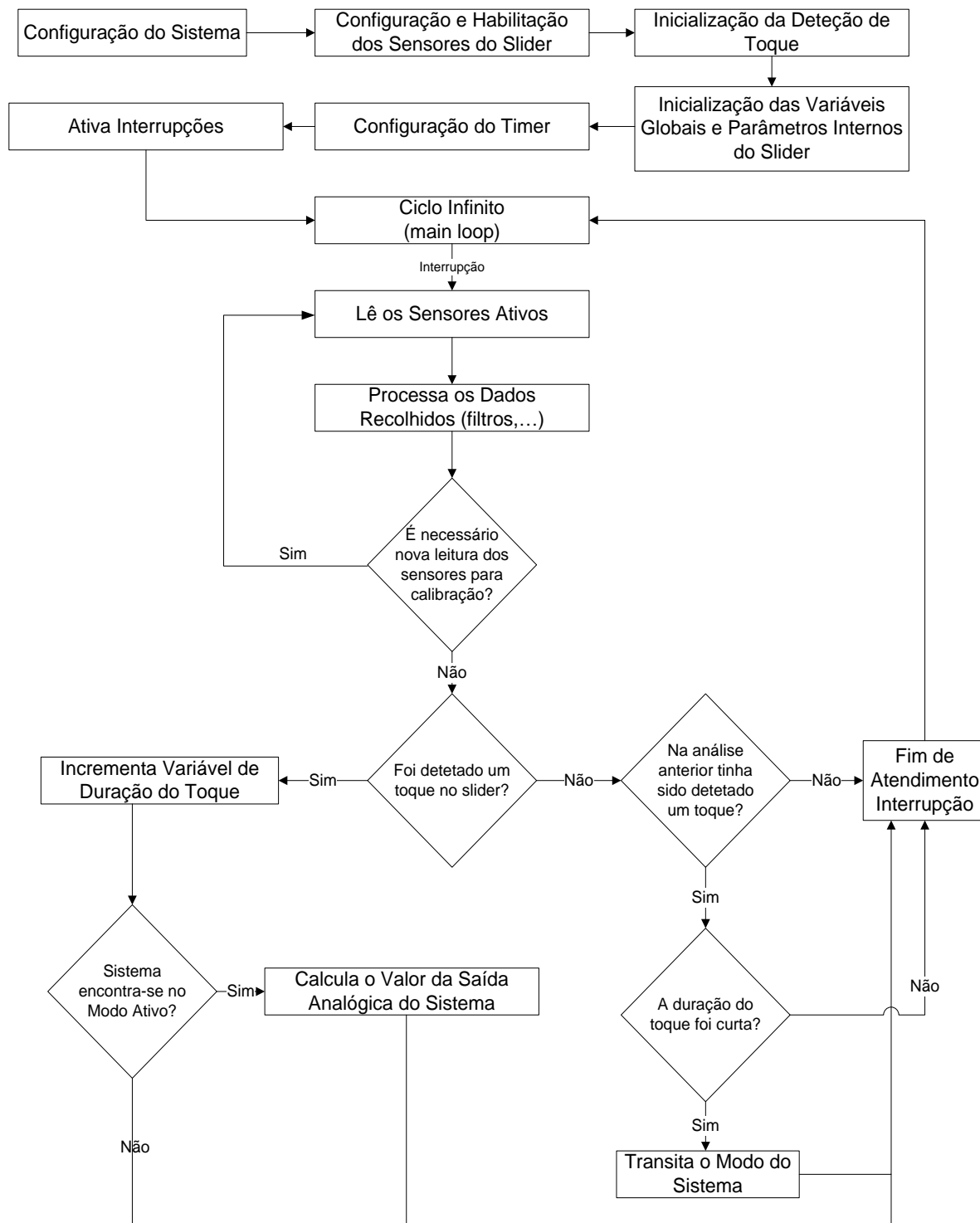


Figura 97 Diagrama do Algoritmo de *Firmware* Demonstrador da Tecnologia

Inicializa-se as variáveis globais e os parâmetros internos da régua capacitiva (define-se a sensibilidade e a velocidade máxima da régua capacitiva, entre outros parâmetros necessários). Configura-se um timer para gerar interrupções com um período de relógio fixo, onde a cada interrupção é feita a leitura dos sensores da régua capacitiva e ativam-se as interrupções.

Quando ocorre uma interrupção, os sensores são lidos e os valores recolhidos são processados. Como o sistema final deve funcionar com superfícies de toque com uma espessura de 8 milímetros é necessário usar condensadores de amostragem com uma capacidade elevada para aumentar a sensibilidade do sistema ao toque. Contudo, o uso dessas capacidades introduz ruídos avultados nas amostras. É necessário então usar filtros de *software* para reduzir a influência do ruído. O filtro utilizado no algoritmo lê 16 amostras do sensor, ordena-as, elimina 4 amostras de cada extremo e efetua uma média com as 8 amostras centrais. Elimina-se assim a influência de amostras que variem muito rapidamente (normalmente devido a ruídos) e o facto de se lerem sempre 16 novas amostras evita-se que esses ruídos se propaguem no tempo (filtro FIR).

Após a aplicação do filtro é verificada a necessidade de realizar novas leituras para calibração dos sensores. Se for necessário, realizaram-se novas leituras, se não passa-se à etapa seguinte.

De seguida, é verificado se foi detetado um toque na régua capacitiva. Se existir um toque, incrementa-se uma variável que contabiliza a duração do toque e verifica-se se o sistema se encontra no modo ativo. Se sim, calcula-se o valor da saída analógica em função da distância e do sentido percorrido pelo dedo. Se não, termina-se a rotina de atendimento à interrupção.

Caso não seja detetado um toque na régua capacitiva, é verificado se na análise anterior havia um toque detetado. Caso negativo, termina-se a rotina de atendimento à interrupção. Caso positivo, verifica-se qual foi a duração do toque. Se o toque foi longo, termina-se a rotina de atendimento à interrupção. Se o toque foi curto, o sistema transita de modo de funcionamento. Isto é, se o sistema estava no modo ativo, guarda o valor da saída analógica, desliga a régua de leds e transita para o modo adormecido. Se o sistema estava no modo adormecido, recupera o valor da saída analógica, ativa os leds correspondentes a essa saída e transita para o modo ativo.

6.3. Régua Capacitiva Analógica

Considerando os resultados obtidos nos capítulos anteriores, desenvolveu-se um comando do tipo régua capacitiva cujas saídas, uma analógica e outra digital, permitem controlar uma régua de LEDs e adormecer ou ativar o modo de funcionamento do sistema respetivamente. Usando o *Altium Designer 10* e as bibliotecas para o programa fornecidas pela *Atmel*, desenvolveu-se uma régua capacitiva com geometria retangular e uma régua capacitiva com geometria triangular.

Todos os resultados apresentados abaixo foram obtidos com um condensador de amostragem com 100 nano Farads de capacidade.

6.3.1. Régua Capacitiva com Geometria Retangular

A primeira solução proposta para o problema consiste numa régua capacitiva espacialmente interpolada com uma geometria retangular, tal como é demonstrado na Figura 98.

A régua capacitiva tem 60 milímetros de comprimento por 20 milímetros de largura e tem um espaçamento entre transdutores de 0.4 milímetros. Pretende-se assim verificar a resposta desta régua utilizando uma superfície de toque composta por uma camada de acrílico com 4.5 milímetros de espessura e um vidro com 4 milímetros de espessura, formando uma espessura total de 8.5 milímetros.

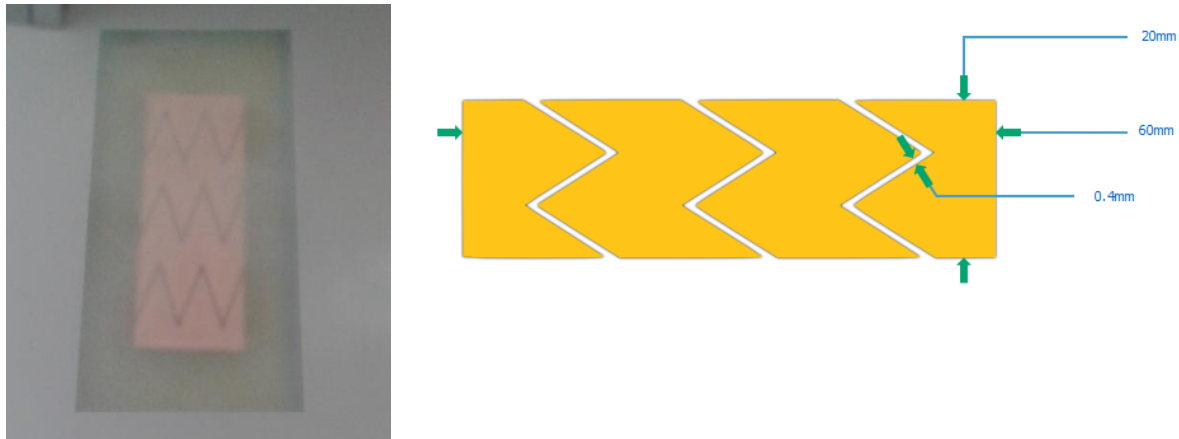


Figura 98 Régua Capacitiva com Geometria Retangular

Na execução desta experiência utilizou-se o *firmware* descrito em 6.2 e o toque foi efetuado com o dedo indicador.

Primeiro, verificou-se a intensidade do ruído que afeta o sistema na ausência de toque. Os resultados a este teste estão expostos na Tabela 7.

Tabela 7 Ruído no Sistema

| Canal | Intensidade média do Ruído | Pico máximo de Ruído |
|--------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| 1 (Transdutor Divido em duas partes) | 4.3 | 8 |
| 2 | 9.4 | 32 |
| 3 | 8 | 28 |

Como se pode verificar, existe uma forte presença de ruído no sinal do sensor capacitivo. É então necessário usar filtros de *software* para que situações de erro, como falsos toques, sejam evitadas.

A Figura 99 mostra a resposta da régua capacitiva ao toque. O gráfico superior representa o sinal proveniente de cada um dos 3 sensores capacitivos que formam a régua quando são realizados toques e movimentos ao longo da régua, o gráfico intermédio representa a posição detetada para o toque em função do tempo ao longo da régua (dividida em 256 posições distintas) e o último gráfico mostra a saída do sistema, ou seja, o número de LEDs que se encontram ligados na régua de LEDs.

Olhando para o gráfico superior e comparando com os valores de pico do ruído apresentados na Tabela 7 verifica-se que a amplitude do ruído pode atingir cerca de metade da variação imposta pelo toque no sensor capacitivo. Por outras palavras, a presença do ruído é muito forte o que obriga a se usar um filtro forte para filtrar as amostras. Contudo, o uso de um filtro forte

leva a que o sistema se torne lento. Usou-se um filtro baseado na média com rejeição de extremos, ou seja, só de 16 em 16 amostras lidas é que o sinal do sensor é verdadeiramente atualizado e se procede ao cálculo da posição do toque. A consequência desta técnica pode ser visualizada nos gráficos: não há uma variação ligeira do sinal proveniente de cada sensor e como consequência a posição atribuída ao dedo na régua capacitiva também varia com pouca “subtileza”.

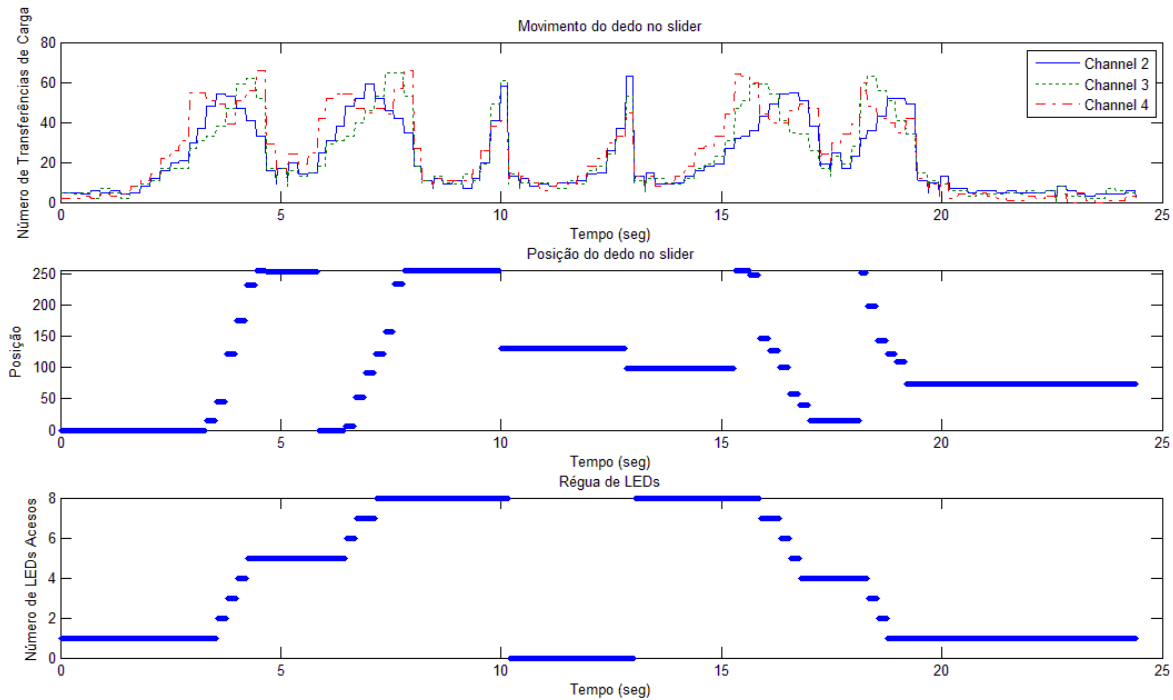


Figura 99 Resposta de uma Régua Capacitiva (Superfície Toque com Acrílico:4.5mm e Vidro:4mm)

Do ponto de vista do funcionamento do sistema: dos 0 aos 9 segundos são executados dois movimentos na régua no sentido ascendente que aumentam o valor da saída analógica do sistema, ou seja, incrementam o número de LEDs acesos. No segundo 10 é executado um toque curto, que transita o sistema para o modo adormecido, desligando a régua de LEDs. Aproximadamente aos 13 segundos efetua-se outro toque curto que ativa o sistema e recupera a saída analógica do sistema. Por fim, são realizados dois movimentos na régua capacitiva no sentido descendente que diminuem o valor da saída analógica do sistema.

Se diminuirmos um pouco a espessura da superfície de toque, para os 7 milímetros totais, verifica-se que a sensibilidade ao toque aumenta, facilitando a distinção entre os sinais provenientes de cada sensor da régua capacitiva e, como consequência, facilitando o cálculo da posição (Figura 49). O acréscimo de sensibilidade ao toque permite reduzir o salto entre posições consecutivas atribuídas ao dedo. O que foi anteriormente dito pode ser observado comparando os gráficos que representam a posição do dedo na régua da Figura 99 e da Figura 100. O aumento da sensibilidade ao toque traduz-se num aumento do conforto de utilização do sistema já que se a intensidade do sinal se torna maior e o impacto do ruído no sistema menor.

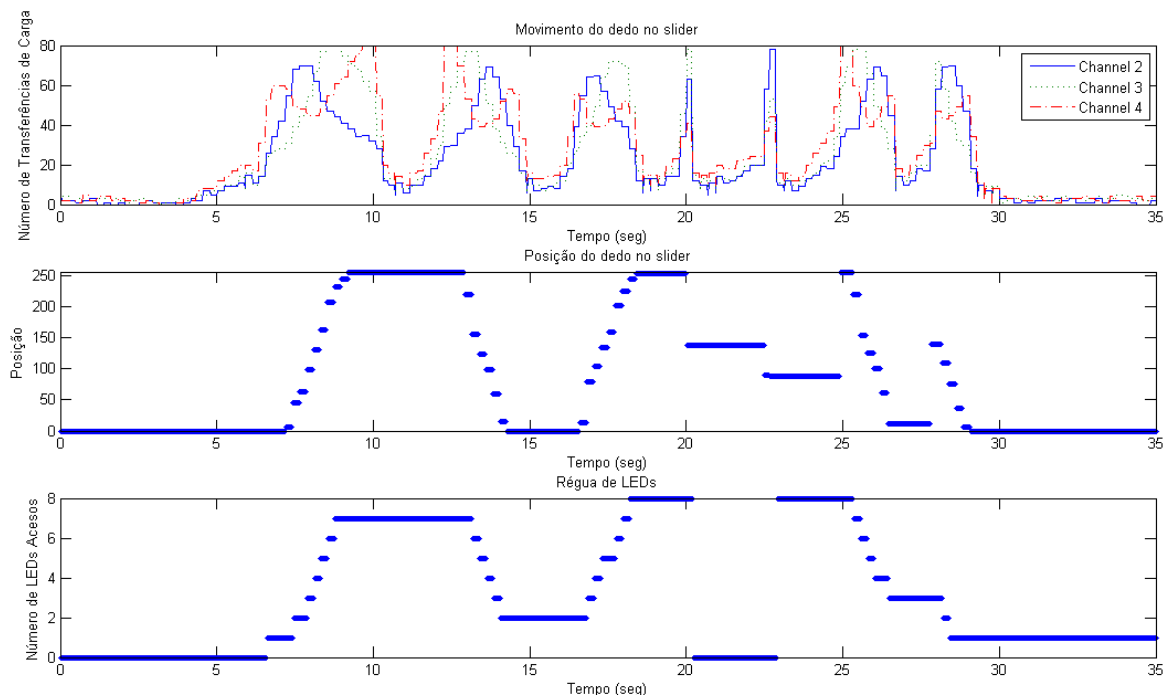


Figura 100 Resposta de uma Régua Capacitiva (Superfície Toque com Acrílico:3mm e Vidro:4mm)

Como referenciado em 2.4.2, a água produz um efeito similar ao do dedo num sensor capacitivo. A Figura 101 e a Figura 102 representam experiências efetuadas com o vidro humedecido e na presença de uma “poça” de água no vidro.

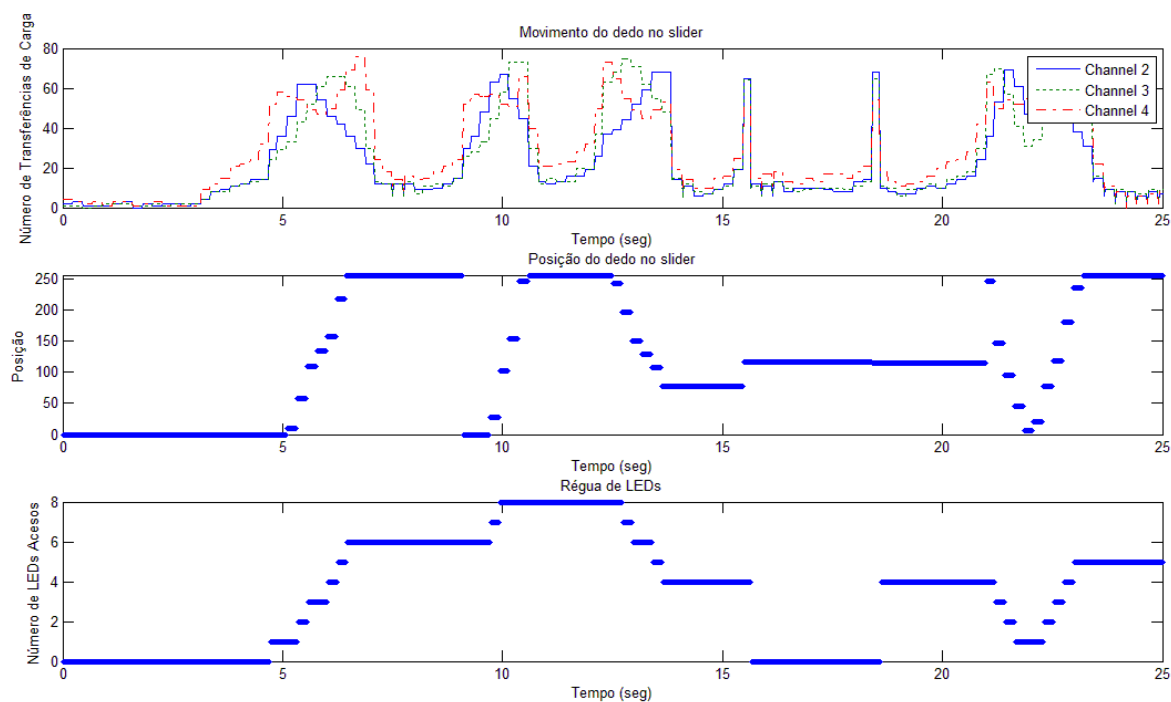


Figura 101 Resposta da Régua Capacitiva com o Vidro Humedecido

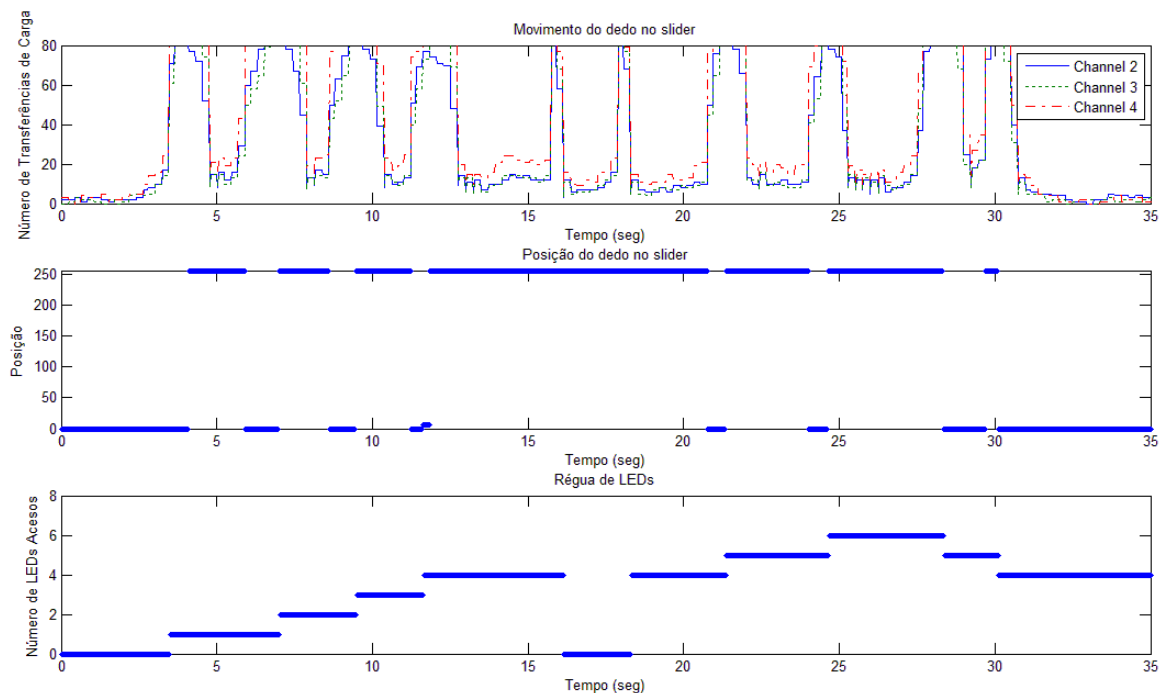


Figura 102 Resposta da Régua Capacitiva existindo uma Poça de Água sobre o Vidro

Como se pode observar, o facto de o vidro se encontrar humedecido não produz qualquer impacto na resposta do sistema, funcionando como pretendido.

O mesmo já não se pode afirmar na situação de existência de uma “poça” de água sobre o vidro. Nesta situação, apenas a funcionalidade digital de transição entre o modo adormecido e ativo funciona corretamente. A funcionalidade analógica é inutilizada porque durante o toque, todos os sensores transmitem uma variação de sinal muito parecida tornando impossível a determinação da posição real do dedo.

Por fim, estudou-se a resposta do sistema junto a um emissor de radiofrequência, por outras palavras, colocou-se um telemóvel sobre o vidro e efetuou-se uma chamada telefónica enquanto se realizava toques na régua capacitivas. Os resultados obtidos encontram-se representados na Figura 103.

Como se observa, o sistema funciona normalmente na presença de ruído de radiofrequência. Tanto a saída analógica como a digital apresentam o resultado pretendido.

Conclui-se assim que é possível utilizar uma régua capacitiva com uma superfície de toque composta por acrílico e vidro (com espessura de 8.5 milímetros) como um potenciómetro.

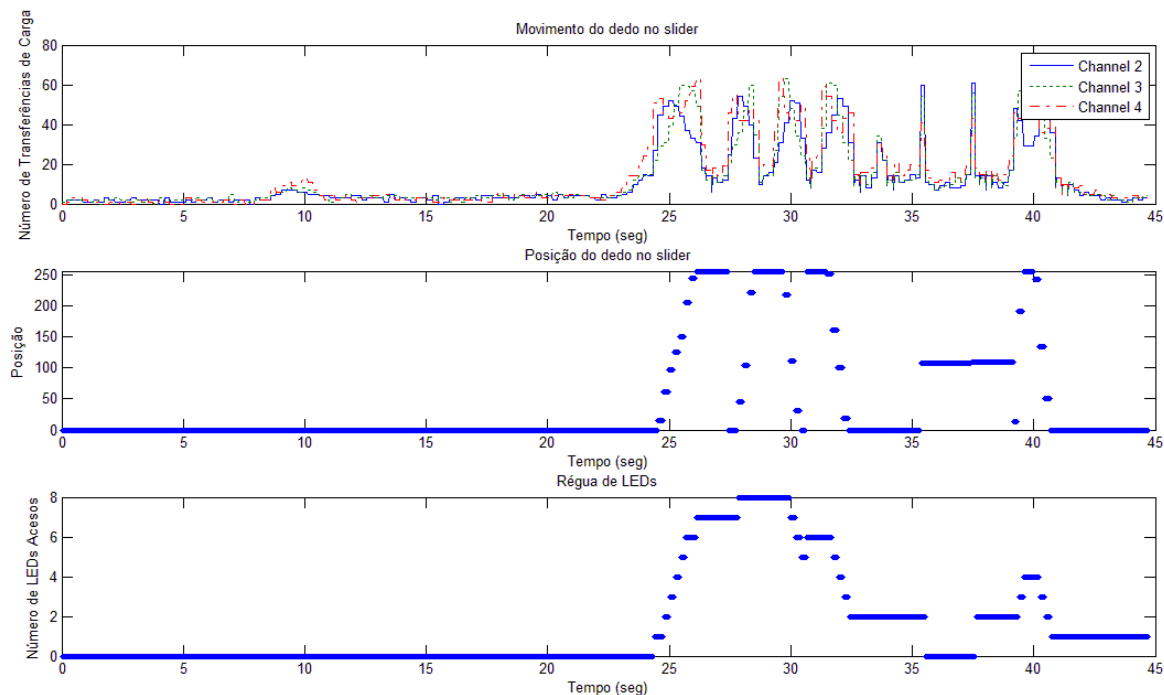


Figura 103 Resposta da Régua de Capacitiva na proximidade de um Emissor de Radiofrequência

6.3.2. Régua Capacitiva com Geometria Triangular

A segunda solução proposta para o problema consiste numa régua capacitiva interpolada com resistências e com uma geometria triangular, tal como é demonstrado na Figura 104.

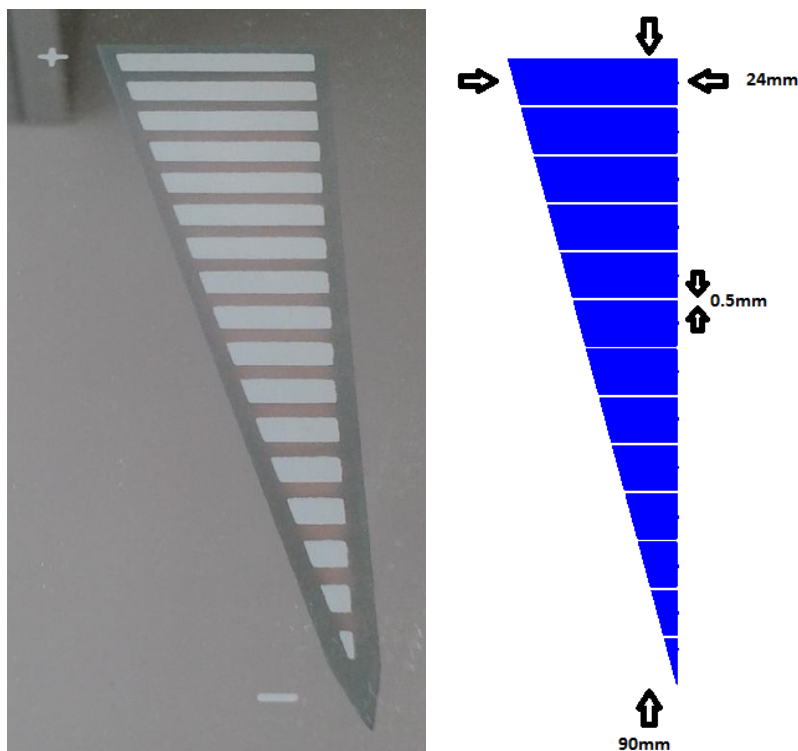


Figura 104 Régua Capacitiva com Geometria Triangular

Calibração Final de Sensores Capacitivos

A régua capacitiva tem 90 milímetros de comprimento por 24 milímetros de largura na zona superior e tem um espaçamento entre transdutores de 0.5 milímetros. Pretende-se assim verificar a resposta desta régua utilizando uma superfície de toque composta por uma camada de acrílico com 4.5 milímetros de espessura e um vidro com 4 milímetros de espessura, formando uma espessura total de 8.5 milímetros.

Na execução desta experiência utilizou-se o *firmware* descrito em 6.2 e o toque foi efetuado com o dedo indicador.

Iniciou-se os testes a esta régua capacitiva verificando a intensidade do ruído que afeta o sistema na ausência de toque. Os resultados obtidos encontram-se expostos na Tabela 8.

Tabela 8 Ruído no Sistema

| Canal | Intensidade média do Ruído | Pico máximo de Ruído |
|--------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| 1 (Transdutor Divido em duas partes) | 11.2 | 49 |
| 2 | 8.8 | 38 |
| 3 | 9.8 | 28 |

Como se pode apurar, existe uma forte presença de ruído no sinal do sensor capacitivo. Comparando a Tabela 8 com a Tabela 7 verifica-se que uma régua capacitiva interpolada com resistências é mais afetada pelo ruído, tal como já se tinha verificado em 5.2.6.

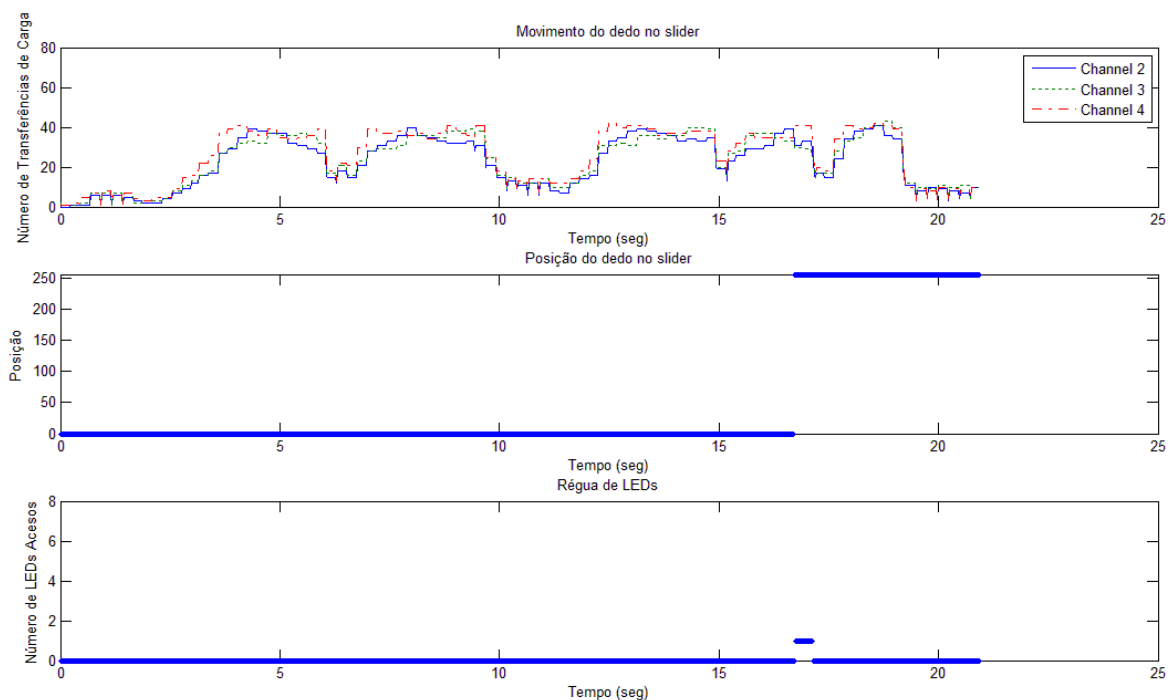


Figura 105 Resposta de uma Régua Capacitiva (Superfície Toque com Acrílico:4.5mm e Vidro:4mm)

A Figura 105 mostra a resposta desta régua capacitiva ao toque e ao movimento do dedo com uma superfície de toque com espessura total de 8.5 milímetros. No gráfico superior da figura observa-se que os 3 canais ligados aos sensores têm uma variação no tempo muito semelhante entre si. A inexistência de uma distinção clara dos sinais impossibilita o microcontrolador de calcular a posição do toque e definir as saídas correspondentes. Assim sendo, nestas condições o sistema

falha. A razão encontra-se na falta de sensibilidade ao toque por parte da régua capacitiva. O aumento da sensibilidade incrementando a capacidade do condensador de amostragem não parece aconselhável pois, o sistema já é bastante afetado pelo ruído e o aumento da capacidade iria aumentar ainda mais a sua intensidade. Pode-se melhorar a sensibilidade de duas maneiras: ou diminuindo a espessura da superfície de toque ou afastando o plano condutor flutuante do vidro da régua capacitiva.

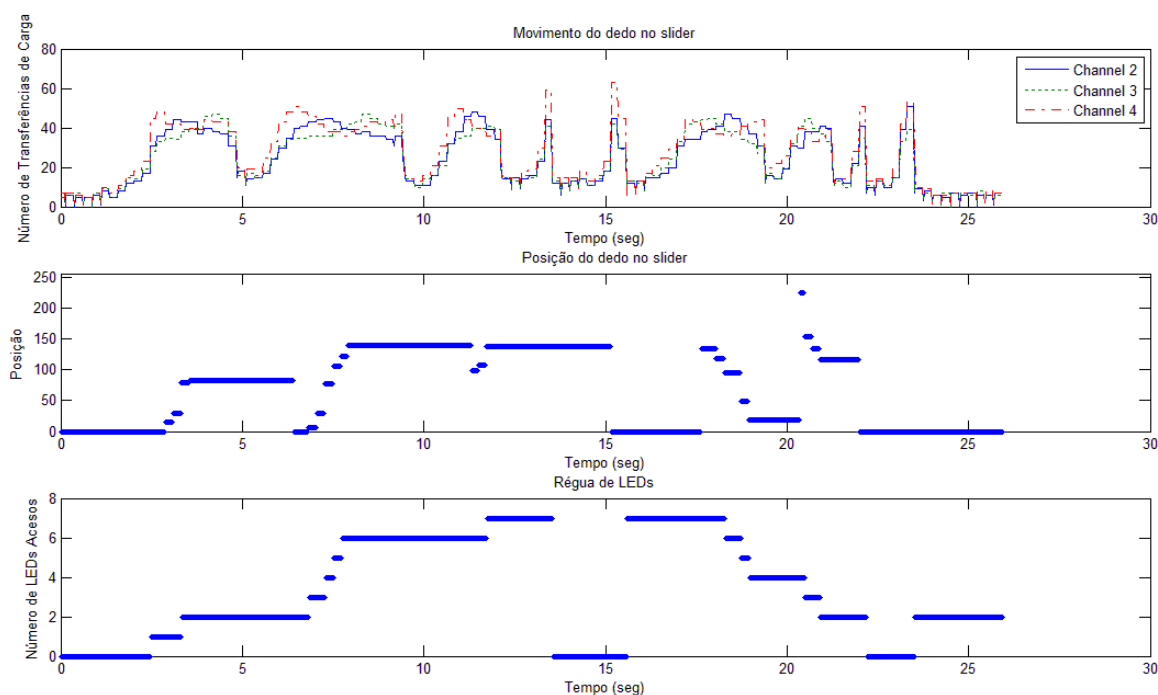


Figura 106 Resposta de uma Régua Capacitiva (Superfície Toque com Acrílico:3mm e Vidro:4mm)

No gráfico intermédio da Figura 106 observa-se que a régua capacitiva não tem sensibilidade suficiente na sua zona mais estreita porque não é atribuída qualquer posição ao toque nessa zona. Por outras palavras, o microcontrolador não consegue detetar o toque para os 3.5 milímetros de comprimentos onde a régua é mais estreita.

A Figura 107 corresponde à resposta da régua capacitiva de geometria triangular trocando o vidro da imagem da esquerda da Figura 104 pelo vidro da imagem da esquerda da Figura 98, por outras palavras, afastando o plano condutor flutuante dos transdutores. Verifica-se que há um acréscimo de sensibilidade ao toque, de tal forma que a régua capacitiva passa a ser capaz de detetar a posição do dedo em toda a sua extensão, embora haja necessidade de se realizar um toque mais “forte” na zona onde os transdutores possuem menores dimensões.

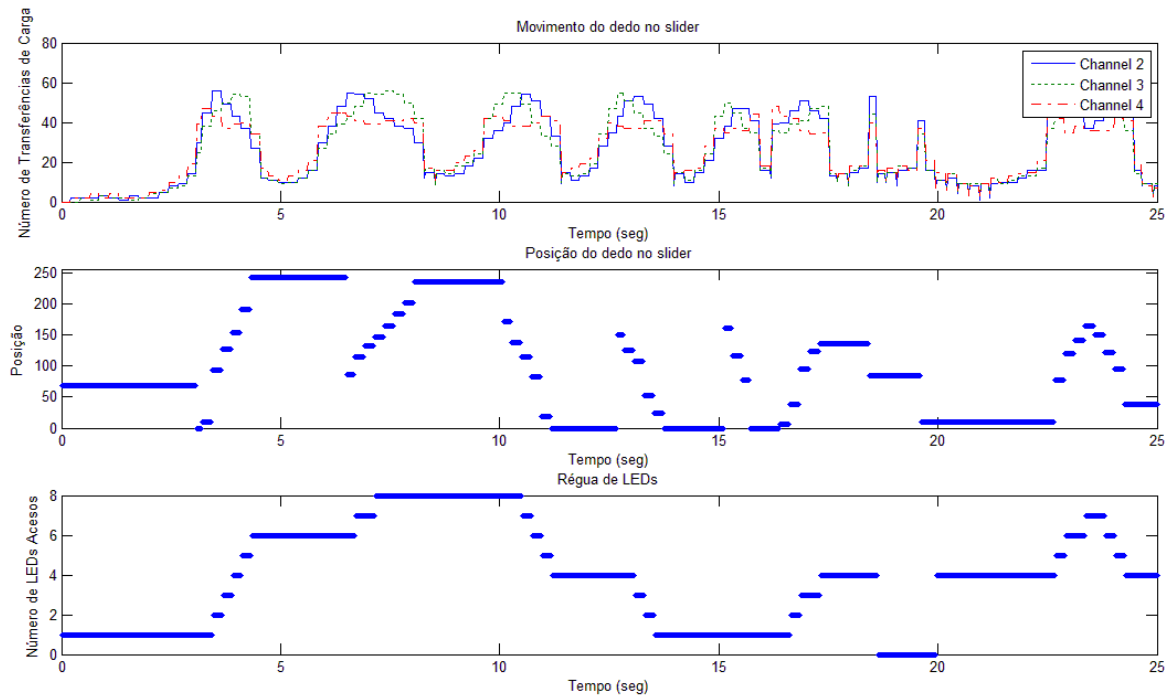


Figura 107 Resposta de uma Régua Capacitiva (Superfície Toque com Acrílico:4.5mm e Vidro:4mm) num Vidro de Geometria Retangular

6.4. Régua Capacitiva Digital

Um estudo complementar deste projeto de dissertação consiste em construir um sistema baseado numa régua capacitiva digital. Ao contrário da régua capacitiva analógica, aqui não existe dois tipos de saída. Considere-se como exemplo que o número de níveis de comando de uma régua capacitiva digital corresponde ao número de sensores existentes na régua.

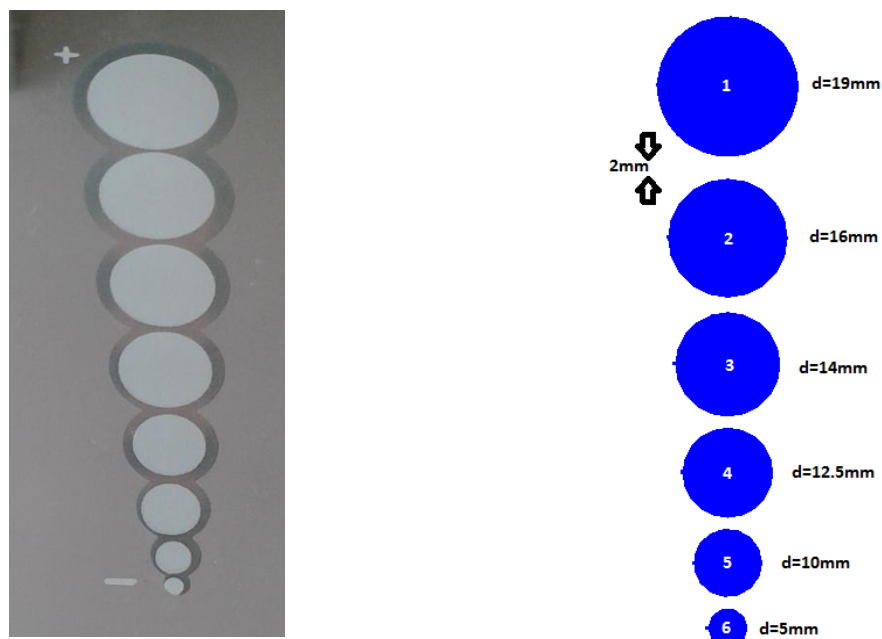


Figura 108 Régua Capacitiva Digital

A solução proposta para este problema encontra-se representada na Figura 108. A régua capacitiva digital é constituída por 6 transdutores de geometria circular com diâmetros diferentes com um espaçamento entre si de 2 milímetros. Tal como nas experiências efetuadas nas régua capacitivas analógicas, o toque foi realizado com o dedo indicador.

A Tabela 9 mostra o ruído presente no sistema e que afeta cada sensor da régua capacitiva.

Tabela 9 Ruído no Sistema

| Sensor | Intensidade média do Ruído | Pico máximo de Ruído |
|--------|----------------------------|----------------------|
| 1 | 8.5 | 21 |
| 2 | 4 | 9 |
| 3 | 2.5 | 5 |
| 4 | 2.5 | 7 |
| 5 | 2.4 | 6 |
| 6 | 3.4 | 9 |

Analisando a tabela verifica-se que todos os sensores são atingidos por uma quantidade significativa de ruído, sendo o sensor cujo transdutor possui a maior área o mais afetado pelo ruído. É necessário o uso de filtros de *software* para lidar com o ruído.

A Figura 109 mostra a resposta da régua capacitiva ao toque. O gráfico superior corresponde à variação do sinal de cada sensor devido ao toque enquanto que o gráfico inferior corresponde ao LED ligado respeitante ao último sensor a ser definido como “tocado” (1 corresponde ao sensor S1, 2 corresponde ao sensor S2 e assim consecutivamente). Como se pode observar, há uma forte existência de *crossstalk* entre sensores, levando a que o sinal de um determinado sensor tocado se propague para o sensor cujo transdutor é de maior dimensão definindo-o sempre como “tocado”. Este fator torna a régua capacitiva inutilizável.

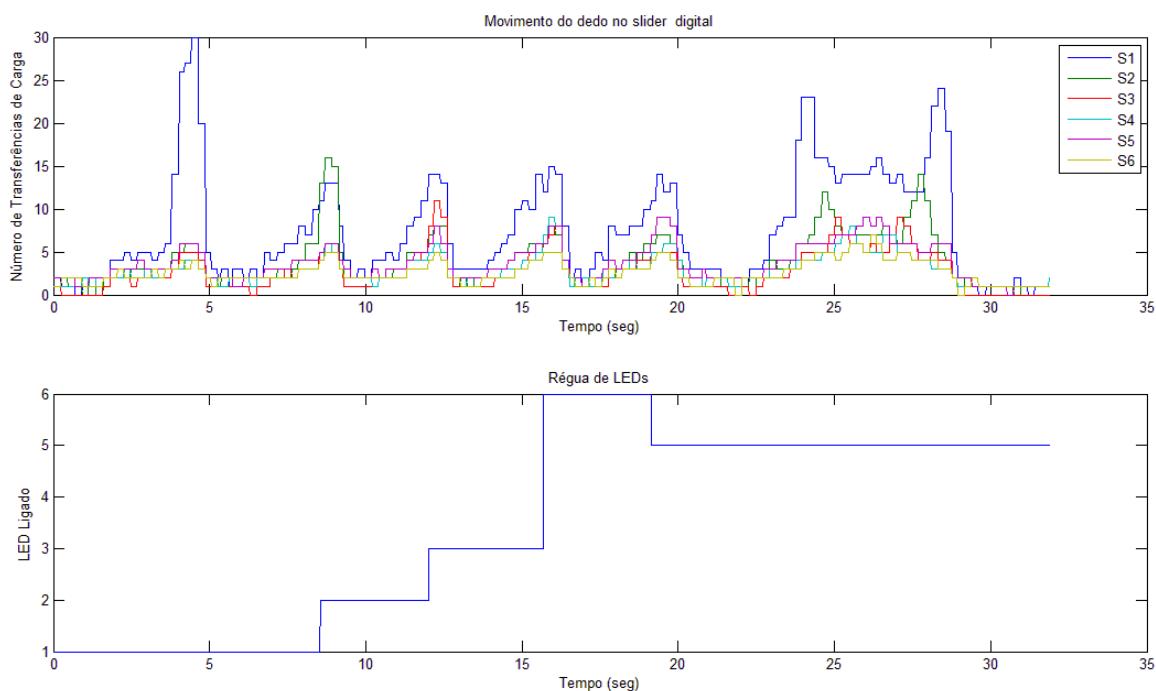


Figura 109 Resposta de uma Régua Capacitiva (Superfície Toque com Acrílico:4.5mm e Vidro:4mm)

De forma a reduzir o efeito de *crosstalk*, procurou-se afastar o plano condutor flutuante dos transdutores substituindo o vidro representado na imagem da esquerda da Figura 108 pelo vidro da imagem da esquerda da Figura 98. Os resultados obtidos encontram-se representados na Figura 110.

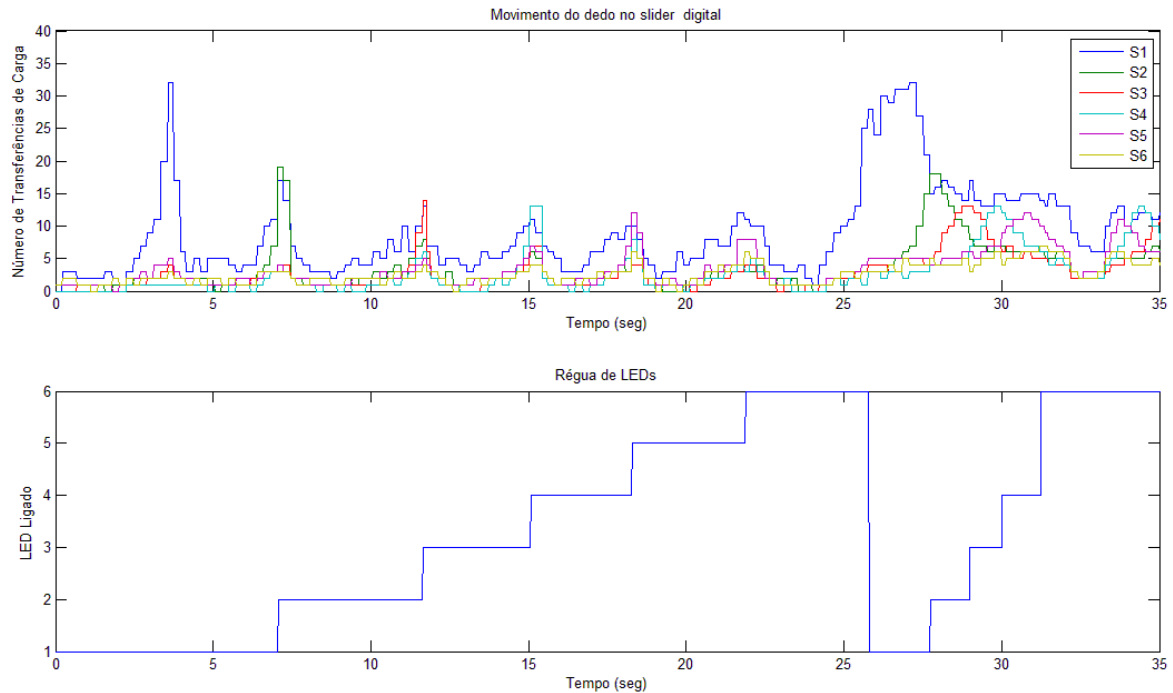


Figura 110 Resposta de uma Régua Capacitiva (Superfície Toque com Acrílico:4.5mm e Vidro:4mm) num Vidro de Geometria Retangular

O afastamento do plano condutor flutuante resulta num acréscimo da sensibilidade ao toque dos sensores capacitivos e reduz o efeito de *crosstalk*. Contudo, continua-se a notar um forte efeito do toque em qualquer um dos sensores no sensor cujo transdutor possui a maior área.

Do ponto de vista da utilização da régua capacitiva digital verificou-se que para toques realizados isoladamente em cada sensor o sistema é capaz de definir corretamente a saída do sistema. O mesmo já não se pode dizer na realização de um movimento contínuo ao longo da régua capacitiva.

Utilizando transdutores com as mesmas dimensões e/ou utilizando planos estreitos ligados à *terra* entre transdutores permitiria reduzir o efeito de *crosstalk*, no entanto esta última solução iria reduzir a sensibilidade ao toque por parte da régua capacitiva digital (5.2.3).

6.5. Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas duas soluções para implementação de uma régua capacitiva, ou seja, uma solução analógica e outra digital.

No caso da régua capacitiva analógica, foram atingidos os objetivos pretendidos para ambas as geometrias, isto é, tanto a régua capacitiva analógica retangular como a triangular são capazes de realizar o comando de uma régua de LEDs e transitar através de toque curto o sistema entre o modo de funcionamento adormecido e o modo de funcionamento ativo. A principal

conclusão que se retirou das experiências realizadas com os vidros consiste no facto de que se deve manter sempre que possível o plano condutor flutuante que reveste o vidro o mais afastado possível dos transdutores pois, este reduz a sensibilidade ao toque e proporciona o *crosstalk* entre os sensores capacitivos.

No caso da régua capacitiva digital, devido ao forte *crosstalk* entre os sensores capacitivos, um movimento contínuo na régua produz um resultado inesperado na saída do sistema, tornando-a inútil. Devido à necessidade de construir novos teclados capacitivos e à aproximação do prazo de entrega deste trabalho de dissertação não foi possível melhorar esta solução.

7. Conclusões e Trabalho Futuro

Durante a execução deste trabalho de dissertação foram realizados estudos a métodos de calibração para dois tipos de tecnologia de leitura de sensores capacitivos, ou seja, leitura da capacidade através da análise da frequência de oscilação e por transferência de carga entre capacidades. A Tabela 10 resume as conclusões que se retiraram dos resultados obtidos para os métodos de calibração de sensores capacitivos estudados no âmbito deste projeto de dissertação.

Tabela 10 Resumo dos resultados dos métodos de calibração de sensores capacitivos estudados

| Parâmetro | Resultado |
|---|---|
| Condensador de Amostragem (<i>Atmel</i> : Transferência de Carga) | Ganho aparentemente linear de sensibilidade ao toque com o aumento da capacidade do condensador de amostragem. A presença de ruído no sistema aumenta com o incremento da capacidade, sendo necessário um maior processamento de sinal. |
| Tensão de Referência dos Comparadores (<i>Microchip</i> : Oscilador RC) | Ganho de sensibilidade ao toque com o aumento da rapidez do sistema. |
| Área do Transdutor | A sensibilidade ao toque é máxima quando a área do transdutor capacitivo é aproximadamente igual à área ocupada pelo toque do utilizador. |
| Espessura da Superfície de Toque | Decréscimo, segundo uma função racional, da sensibilidade ao toque com o aumento da espessura da superfície de toque. |
| Material da Superfície de Toque | Quanto maior a permissividade elétrica relativa do material que constitui a superfície de toque, maior será a capacidade de deteção do toque por parte do sistema. |
| Planos Condutores Flutuantes | Reduzem a sensibilidade ao toque e causam interferências entre os diversos sensores capacitivos (<i>crosstalk</i>). |
| Planos Condutores Ligados Eletricamente à terra | Reduzem a sensibilidade ao toque quando colocados junto aos sensores capacitivos. |
| Ligação Microcontrolador – Transdutor Capacitivo | Quanto maior o comprimento da ligação, maior será a capacidade parasita do sistema e, consequentemente, menor será a sensibilidade do sensor ao toque. |
| Geometria do Transdutor | A sensibilidade ao toque é máxima quando a geometria do transdutor capacitivo se assemelha à geometria do toque do utilizador. |

Tendo em atenção os resultados obtidos considera-se impossível chegar a uma conclusão concreta de qual a melhor tecnologia. Como o conjunto de desenvolvimento da *Microchip* é composto por um único circuito integrado onde os transdutores capacitivos e os *chips* se encontram

colocados, foi impossível criar situações de teste semelhantes que permitissem obter dados para comparação das tecnologias. O único ponto de comparação registrado refere-se à perda de sensibilidade ao toque com o aumento da espessura da superfície de toque. Por outras palavras, verificou-se que a tecnologia de leitura utilizada pela *Microchip* perde de forma mais significativa a sua capacidade de detecção do toque comparativamente à tecnologia de leitura utilizada pela *Atmel* quando se aumenta a espessura da superfície de toque. Para se realizar um estudo mais aprofundado que permitisse obter outros dados para comparação das tecnologias seria necessário a aquisição em separado dos microcontroladores da *Microchip*.

Dos estudos efetuados às duas tecnologias de leitura de sensores capacitivos é possível concluir que existem métodos de calibração de sensores capacitivos gerais a todas as tecnologias como áreas, espessuras, tipo de material, entre outros e existem métodos de calibração particulares a cada tecnologia, ou seja, no caso da *Atmel* é possível calibrar a sensibilidade ao toque variando a capacidade do condensador de amostragem e no caso da *Microchip* calibra-se alterando a diferença entre as tensões de referência dos comparadores do sistema.

Este projeto de dissertação tem como objetivo o estudo, desenvolvimento e implementação de um sistema (*hardware e firmware*) baseado em sensores capacitivos para detecção do toque e do seu movimento. Uma das pretensões da *Exatronix* consiste na aplicação de sensores capacitivos em vidros, que possuiriam uma interface para o utilizador que permitisse o comando de regulação através do toque e movimento no vidro.

Os estudos efetuados aos métodos de calibração de sensores capacitivos nos capítulos 4 e 5 e as soluções apresentadas no capítulo 6 permitiram atingir o objetivo proposto, por outras palavras, desenvolveu-se um protótipo de um comando do tipo régua capacitiva “analógica” que é capaz através do toque e movimento do dedo ao longo da régua efetuar o comando de uma barra de LEDs. Complementarmente foi também desenvolvida uma versão “digital” da régua capacitiva. Contudo, não foi possível calibrá-la para o funcionamento pretendido em tempo útil do desenvolvimento deste projeto de dissertação. Para esta versão será necessário no futuro realizar estudos adicionais para diminuição do *crosstalk* entre sensores de forma a desenvolver uma solução que cumpra os requisitos pretendidos.

Atendendo ao sistema desenvolvido com sucesso, conclui-se que é possível construir uma aplicação de sensores capacitivos que detetem o toque e movimento humano utilizando uma superfície de toque, composta por vidro e acrílico, com pelo menos 8.5 milímetros de espessura. Contudo, o conforto e a velocidade de resposta da aplicação dependente fortemente do tipo e da espessura do material utilizado na constituição da superfície de toque. Soluções que maximizem a sensibilidade ao toque e que minimizem a necessidade de processamento de sinal facilitam a conceção do sistema e produzem um maior conforto e facilidade de utilização para o utilizador.

Na utilização de réguas capacitivas na proximidade de planos condutores, ainda que flutuantes, um dos pontos principais a que se deve prestar atenção consiste na distância entre a camada condutora e os transdutores capacitivos: deve-se sempre procurar maximizar essa distância. A geometria da régua capacitiva deverá ser linear, por outras palavras, todos os transdutores capacitivos devem possuir áreas e geometrias semelhantes para que se evite desequilíbrios da sensibilidade ao toque entre zonas de maior área efetiva e zona de menor área.

Para trabalho futuro, na solução desenvolvida com sucesso propõe-se a integração de todos os componentes do sistema no mesmo circuito integrado, reduzindo dessa forma o comprimento da interligação dos componentes. Como estudado neste projeto, este fator permite reduzir a influência do ruído para o sistema e diminuir a perda de sensibilidade ao toque.

Bibliografia

- [1] P. Kosina, L. Hajkova, J. Sandera e T. Symersky, “The Capacitive Sensor,” *Electronics Tecnology*, vol. 32, pp. 1-4, May 2009.
- [2] L. K.Baxter, *Capacitive Sensors: Design and Applications*, New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1997.
- [3] R. Puers, “Capacitive Sensors: when and how to use them,” *Sensors and Actuators*, Vols. %1 de %237-38, pp. 93-105, 1993.
- [4] M. McComb, “Introduction to mTouch Capacitive Touch Sensing,” 19 December 2008. [Online]. Available: <http://www.youtube.com/watch?v=JVRuDY4X88M&NR=1>. [Acedido em December 2012].
- [5] P. Madaan e P. C. S. Kaur, “An introduction to Capacitive Sensing—Part I,” April 2012. [Online]. Available: <http://www.eetimes.com/design/industrial-control/4371081/An-introduction-to-Capacitive-Sensing-Part-I?pageNumber=0>.
- [6] T. Davis, S. Kolokowsky e Cypress, “EEweb: From Touch to Call - Tracing the Path of a Touch Gesture,” Cypress, 19 May 2011. [Online]. Available: http://www.eeweb.com/blog/trevor_davis/from-touch-to-call-tracing-the-path-of-a-touch-gesture. [Acedido em Maio 2012].
- [7] P. Madaan e P. a. C. S. Kaur, April 2012. [Online]. Available: <http://www.eetimes.com/design/industrial-control/4371687/An-introduction-to-Capacitive-Sensing-Part-II>.
- [8] Atmel, “Buttons, Sliders and Wheels Sensor Design Guide,” 2011.
- [9] T. Perme, “Layout and Physical Design Guidelines for Capacitive Sensing,” 2007.
- [10] B. Davison, “Techniques for Robust Touch Sensing Design,” 2010.
- [11] B. Bohn, “Microchip CTMU for Capacitive Touch Applications,” 2009.
- [12] H. Shruti e L. Subbarao, “Designing capacitive sensing for a specific application,” November 2011. [Online]. Available: http://www.analog-eetimes.com/en/designing-capacitive-sensing-for-a-specific-application-part-1-of-3.html?cmp_id=71&news_id=222902740&vID=98. [Acedido em November 2011].
- [13] STMicroelectronics, “Principles of capacitive touch and proximity sensing technology,” 2009.
- [14] Z. Albus, “PCB-Based Capacitive Touch Sensing With MSP430,” 2007.
- [15] D. Fischer, “Capacitive Touch Sensor Technology,” Germany, 2010.
- [16] J. Viljoen, November 2011. [Online]. Available: http://www.analog-eetimes.com/en/design-capacitive-touch-systems-for-robustness-and-manufacturability.html?cmp_id=71&news_id=222902710.
- [17] T.Perme, “Water-Resistant Capacitive Sensing,” 2009.
- [18] L. Mark e Cypress_Semiconductor, 07 Julho 2011. [Online]. Available: <http://www.eetimes.com/design/embedded/4218369/Making-capacitive-touch-sensors-water-tolerant>. [Acedido em December 2011].
- [19] J. v. Wyk, M. Visser, D. Rademeyer e Azoteq, April 2012. [Online]. Available: <http://www.eetimes.com/design/embedded/4370445/A-standards-based-approach-to-capacitive-sensor-EMC-problems->. [Acedido em Abril 2012].
- [20] Azoteq, “Radiated - Immunity Guidelines for ProxSense Designs,” 2011.
- [21] Atmel Corporation, “QTouch Conducted Immunity,” 2011.
- [22] Azoteq, “Conducted Immunity of ProxSense Designs,” 2012.
- [23] Azoteq, “ESD Guidelines,” 2011.
- [24] P. Nandkar e B. S. Gurlinka, “EETimes: Performance versus power in capacitive touch sensing designs,” 9 May 2011. [Online]. Available: <http://www.eetimes.com/design/embedded/4215844/Performance-versus-power-in-capacitive-touch-sensing-designs>. [Acedido em 2012 Abril].
- [25] P. Madaan e P. a. C. S. Kaur, “EETimes: An introduction to Capacitive Sensing—Part II,” 25 April 2012. [Online]. Available: <http://www.eetimes.com/design/industrial-control/4371687/An-introduction->

- to-Capacitive-Sensing-Part-II. [Acedido em 2012 Abril].
- [26] C. Keith e D. Peter, "Metal Over Cap Technology," 2010.
- [27] V. Chan e S. Underwood, "Capacitive Single-Touch Sensor Design Guide," 2008.
- [28] T. Perme, "Introduction to Capacitive Sensing," Microchip, 2007.
- [29] M. Flipse, "Capacitive Sensing with PIC10F," Microchip, 2008.
- [30] Atmel, "Button, Slider & Wheels Solutions," Atmel, 2010.
- [31] Atmel, "Atmel Qtouch Library," Atmel, 2011.
- [32] Atmel, "Buttons, Sliders and Wheels Sensor Design Guide," Atmel, 2011.
- [33] "Universidade Coimbra - Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores," Maio 2009. [Online]. Available: <https://woc.uc.pt/deec/getFile.do?tipo=2&id=7920>. [Acedido em 22 Maio 2012].
- [34] Microchip, "mTouch User's Guide," 2007.
- [35] Azoteq, "Overview of Capacitive Touch and Proximity Sensing Technology," 2010.
- [36] Atmel, "QTouch and QMatrix Sensitivity Tuning for Keys, Slider and Wheels," 2010.
- [37] K. Cheung, March 2008. [Online]. Available: <http://edablog.com/2008/03/24/cypress-webinar/>. [Acedido em October 2011].
- [38] P. Fonseca, Sistemas de Instrumentação Electrónica, Departamento de Electrónica e Telecomunicações: Universidade de Aveiro, 2007/08.
- [39] M. Lee, March 2006. [Online]. Available: <http://www.eetimes.com/design/analog-design/4009622/The-art-of-capacitive-touch-sensing>. [Acedido em October 2011].
- [40] P. Madaan, "Overcoming Capacitive Sensing Limitations," 2010.
- [41] W. Palmer, June 2006. [Online]. Available: <http://www.eetimes.com/design/analog-design/4009869/Building-a-reliable-capacitive-sensor-interface>. [Acedido em October 2011].
- [42] A. Rane, "Capacitive Sensors and their Interface Circuits," Alabama, 2010.
- [43] M. Russ, November 2011. [Online]. Available: http://www.analog-eetimes.com/en/making-sounds-with-analogue-electronics-part-3-envelopes.html?cmp_id=71&news_id=222902739&vID=98.
- [44] unknown, January 1998. [Online]. Available: <http://electronicdesign.com/article/components/capacitive-sensors-offer-numerous-advantages7653.aspx>. [Acedido em October 2011].
- [45] T. Perme, "Introduction to Capacitive Sensing," 2007.
- [46] "Principles of capacitive touch and proximity sensing technology," 2009.

Anexos

Anexo A – Código C do demonstrador de Tecnologia

```
#include "touch_api.h"
#include "clksys_driver.h"

#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#define INTERRUPT_SERVICE_ROUTINE(name, vect) ISR(vect)
#define __delay_cycles(n)      __builtin_avr_delay_cycles(n)
#define __enable_interrupt()   sei()

#define TICKS_PER_MS           1000u
#define MEASUREMENT_PERIOD_MS 1u
#define ON 1
#define OFF 0
#define FILTER_DIM 16

#define SENSOR_CONFIG( from, to, type ) ( ( to << 5 ) | ( from << 2 ) |
type )

/*-----
protótipos
-----*/
static void init_system( void );
static void init_timer_isr( void );
void qt_init_globals( void );
extern int16_t qt_get_sensor_delta( uint8_t );
void filter_media(void);
void sort(void);

/*-----
variáveis
-----*/
static volatile uint8_t time_to_measure_touch = 0u;
static volatile uint16_t current_time_ms_touch = 0u;
static uint16_t old_signal[QT_NUM_CHANNELS];
static uint16_t memoria[QT_NUM_CHANNELS][FILTER_DIM];
static uint8_t k[QT_NUM_CHANNELS] = {0};

int main( void )
{
    uint16_t status_flag = 0u; // flag para sinalização da necessidade de
    leituras adicionais para calibração
    uint16_t burst_flag = 0u; // flag para sinalização da necessidade de
    leituras adicionais para calibração
    init_system(); // Inicia os parâmetros do sistema: host app, pins,
    watchdog, etc
    qt_filter_callback=filter_media;

    // define os sensores activos e os canais utilizados
    qt_enable_slider( CHANNEL_5, CHANNEL_7, NO_AKS_GROUP, 20u, HYST_50,
    RES_8_BIT, 0u );

    qt_init_sensing(); // Inicia a leitura dos sensores
    qt_init_globals( ); // Inicia os parâmetros globais do sensor
    init_timer_isr(); // Inicia o TIMER que gera as interrupções

    /* Activa as interrupções */
    __enable_interrupt();
}
```

```

        uint8_t pressed = 0; // Flag para indicação do estado do slider:
pressionado ou não
        int16_t last_pos = 0; // Variável para armazenamento da posição:
para recuperação do valor da saída analógico
        int16_t value = 255; // Última posição lida do dedo no slider
        int16_t speed = 30; // Velocidade máxima com que se incrementa
ou decrementa a variável da saída analógica
        int8_t sensibility = 1; // Fator sensibilidade: 1 - Uma passagem
percorre dos 0-100, 2 - Uma passagem percorre dos 0-50 ....
        char val = 0x80; // Valor inicial da saída (apenas 1 LED ligado)
        char last_val; // Variável que armazena o valor dos LEDs quando
o sistema entra no modo adormecido
        uint8_t dig = 0; // Variável auxiliar para determinação se o toque
detetado é um toque curto ou longo
        uint8_t t_curto = 20; // Definição temporal de um toque curto
        char s_states = 0; // Variável de definição de estado do
sensor: ON ou OFF
        char state = ON; // Variável de definição de estado do sistema:
Modo Activo - ON e Modo adormecido - OFF

        /* ciclo infinito */
        for( ; ; ){

            if( time_to_measure_touch ){
                time_to_measure_touch = 0u; // Limpa a flag
                qt_measure_sensors( current_time_ms_touch ); // lê os
sensores

                do{
                    status_flag = qt_measure_sensors( current_time_ms_touch
); // lê os sensores
                    burst_flag = status_flag & QTLIB_BURST_AGAIN;
                }while (burst_flag) ; // Verifica a necessidade de leituras
adicionais para calibração do sensor

                    if(s_states) // Determina a duração do toque - curto ou
longo
                    {
                        if(dig<t_curto)
                            dig++;
                        }else{
                            dig=0;
                        }
                    }

                s_states = qt_measure_data.qt_touch_status.sensor_states[0]; //
Lê o estado do sensor: ON ou OFF

                    if((s_states) && (state == ON)) // Verifica se o sensor se
encontrar no estado pressionado
                    {
                        int16_t pos = 0xFF -
qt_measure_data.qt_touch_status.rotor_slider_values[0]; // lê a posição
do toque no slider

                            if(!pressed) // verifica se o sensor acabou de
transitar de estado: não pressionado para pressionado
                            {
                                last_pos = pos; // guarda a posição actual

```

```

        pressed = 1; // Sinaliza a flag que o sensor já
se encontra pressionado
    }
    int16_t diff = pos - last_pos; // calcula a diferença
entre a posição actual e a posição armazenada em memória do slider
    last_pos = pos; // guarda a posição actual do toque no
slider
    if (diff < - speed) // Limite a velocidade máxima de
variação da saída analógica do sistema
        diff = - speed;
    if (diff > speed) // Limite a velocidade máxima de
variação da saída analógica do sistema
        diff = speed;
    value += diff/sensibility; // Calcula a saída analógica
baseado na sensibilidade do sistema
    if(value < 0 )
        value = 0; // Fixa o valor mínimo da saída
    if(value > 255 )
        value = 255; // Fixa o valor máximo da saída

    val = ~((1<<(value/32))-1); //Activa os LEDs de acordo
com a saída analógica do slider

    }else{
        pressed = 0; // Limpa a flag que indica que o sensor se
encontra pressionado
    }
    if ((dig < t_curto) && (dig > 0) && !(s_states & (1<<0))) //
Verifica se o toque foi curto: caso positivo realiza a respectiva
transição de estado
    {
        if (state == ON)
        {
            state = OFF;
            last_val = val;
            val = 0x00;
        }else{
            state = ON;
            val = last_val;
        }
    }

    PORTE.OUT = ~val; // Liga os LEDs pretendidos: os LEDs são
activos baixo
    }
}

/*=====
Inicializa variáveis globais
=====*/

void qt_init_globals( void )
{
    qt_config_data.qt_di          = 2;
    qt_config_data.qt_neg_drift_rate = 20;
    qt_config_data.qt_pos_drift_rate = 5;
    qt_config_data.qt_max_on_duration = 120;
    qt_config_data.qt_drift_hold_time = DEF_QT_DRIFT_HOLD_TIME;
    qt_config_data.qt_recal_threshold = DEF_QT_RECAL_THRESHOLD;

```



```

}

/*=====
Configura o Timer
=====*/

void init_timer_isr( void )
{
    TCC0.PER = TICKS_PER_MS * MEASUREMENT_PERIOD_MS;
    TCC0.CTRLA = 4;
    TCC0.INTCTRLB = 1;
    PMIC.CTRL |= 1;
}

/*=====
Inicializa o sistema
=====*/
void init_system( void )
{
    CLKSYS_Enable( OSC_RC32MEN_bm );
    CLKSYS_Prescalers_Config( CLK_PSADIV_1_gc, CLK_PSBCDIV_1_1_gc );
    do {} while ( CLKSYS_IsReady( OSC_RC32MRDY_bm ) == 0 );
    CLKSYS_Main_ClockSource_Select( CLK_SCLKSEL_RC32M_gc );

    PORTF.DIRCLR = 0xFF;
    PORTCFG.MPCMASK = 0xFF;
    PORTF.PIN0CTRL = (PORTF.PIN0CTRL & ~PORT_OPC_gm) |
PORT_OPC_PULLUP_gc;

    PORTE.DIRSET = 0xFF;
    PORTE.OUTSET = 0xFF;
}

/*=====
Rotina de atendimento à interrupção
=====*/

ISR(TCC0_CCA_vect)
{
    time_to_measure_touch = 1u;
    current_time_ms_touch += MEASUREMENT_PERIOD_MS;
}

/*=====
Filtro digital baseado na média com rejeição de extremos
=====*/
void filter_media(void)
{
    uint8_t i,t;
    uint8_t m = FILTER_DIM/4;
    long sum;

    for( i = 0u; i < QT_NUM_CHANNELS; i++ )

```

```

{
    if (k[i]<FILTER_DIM)
    {
        memoria[i][k[i]]=qt_measure_data.channel_signals[i];
        qt_measure_data.channel_signals[i]=old_signal[i];
        k[i]++;
    }
    else
    {
        k[i]=0;
        sort();
        sum=0;
        for (t=m;t<(FILTER_DIM-m);t++)
        {
            sum=sum+memoria[i][t];
        }
        sum=sum/(FILTER_DIM/2);
        qt_measure_data.channel_signals[i] = sum;
        old_signal[i] = sum;
    }
}

}

void sort(void)
{
    int t, i, j, mov = 0;
    uint16_t change = 0;

    for( t = 0u; t < QT_NUM_CHANNELS; t++ )
    {
        for (i=0;i<(FILTER_DIM-1);i++)
        {
            for(j=1;j<FILTER_DIM;j++)
            {
                if (memoria[t][j] < memoria[t][j-1])
                {
                    change = memoria[t][j];
                    memoria[t][j] = memoria[t][j-1];
                    memoria[t][j-1] = change;
                    mov++;
                }
            }
        }
    }
}

```